

**INGENIERÍA INDUSTRIAL  
MÁQUINAS Y ESTRUCTURAS  
PROYECTO FIN DE CARRERA**



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

**SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE UNA  
BANDA TRANSPORTADORA Y  
CREACIÓN DEL MODELO DE  
ELEMENTOS FINITOS ASOCIADO**

**Autor: Pablo Hernando Sanz**

**Tutora: DRA. Carolina Álvarez Caldas**

Leganés, 2011

# Índice

## **CAPÍTULO 1: Introducción**

1.1	INTRODUCCIÓN.....	- 12 -
-----	-------------------	--------

## **CAPÍTULO 2: Objetivos del proyecto**

2.1.	OBJETIVOS.....	- 15 -
------	----------------	--------

## **CAPÍTULO 3: Estado del arte**

3.1.	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	- 17 -
3.1.1.	Introducción .....	- 17 -
3.1.2.	El análisis por elementos finitos y el método de los elementos finitos. ....	- 18 -
3.1.2.1.	Resumen histórico .....	- 19 -
3.1.2.2.	Qué es y en qué consiste el MEF .....	- 21 -
3.1.2.3.	Cómo trabaja el MEF .....	- 23 -
3.1.2.4.	Tipos de análisis ingenieriles .....	- 26 -
3.1.2.5.	Opciones que presentan los programas MEF .....	- 27 -
3.1.2.6.	Aplicación del AEF a la ingeniería mecánica .....	- 28 -
3.2.	LA BANDA TRANSPORTADORA.....	- 33 -
3.2.1.	Introducción .....	- 33 -
3.2.2.	Características generales .....	- 34 -
3.2.3.	Tipos de bandas.....	- 34 -
3.2.3.1.	Dependiendo de la movilidad.....	- 34 -
3.2.3.2.	Dependiendo de la posición .....	- 35 -
3.2.3.3.	Dependiendo del tipo de banda y material a transportar .....	- 36 -
3.2.4.	Aplicaciones .....	- 46 -

## **CAPÍTULO 4: Cálculo de la banda transportadora**

4.1.	PARÁMETROS REQUERIDOS.....	- 49 -
4.1.1.	Características del material a transportar .....	- 49 -
4.1.2.	Capacidad requerida y capacidad máxima .....	- 53 -
4.1.3.	Características geométricas de la banda transportadora.....	- 54 -
4.1.4.	Ancho de banda.....	- 57 -
4.1.5.	Velocidad de la banda transportadora .....	- 58 -
4.2.	PARAMETROS CALCULADOS .....	- 60 -
4.2.1.	Capacidad máxima de transporte .....	- 60 -
4.2.2.	Fuerzas en la banda .....	- 65 -
4.2.3.	Potencias en la banda .....	- 77 -
4.2.4.	Tensiones en la banda .....	- 81 -
4.3.	SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE LA BANDA .....	- 89 -
4.3.1.	Selección de la banda .....	- 89 -
4.3.1.1.	La Carcasa.....	- 90 -
4.3.1.2.	La Cubierta.....	- 94 -
4.3.1.3.	Determinación del peso de la banda.....	- 96 -
4.3.1.4.	Determinación del diámetro del rollo de banda .....	- 97 -
4.3.2.	Selección de los rodillos superiores y de retorno .....	- 98 -
4.3.2.1.	Características de los rodillos.....	- 98 -
4.3.2.2.	Selección de los rodillos.....	- 101 -
4.3.3.	Selección de los tambores de carga y descarga .....	- 102 -
4.3.3.1.	Determinación del ancho de cara del tambor .....	- 103 -
4.3.3.2.	Determinación del diámetro de tambor .....	- 103 -
4.3.3.3.	Determinación de la distancia entre apoyos .....	- 105 -

## **CAPÍTULO 5: Programación del software**

5.1.	LENGUAJE VBA .....	- 106 -
5.1.1.	Introducción .....	- 106 -
5.1.2.	Características principales .....	- 107 -
5.1.3.	Formularios (Userforms).....	- 109 -
5.2.	PROGRAMACIÓN DEL SOFTWARE .....	- 114 -
5.2.1.	Interfaces .....	- 114 -
5.2.2.	Características principales y modo de utilización del programa .....	- 127 -
5.2.3.	Macros programadas .....	- 128 -

## **CAPÍTULO 6: Simulación y parametrización de los modelos**

6.1.	SIMULACIÓN CON ANSYS .....	- 133 -
6.1.1.	Introducción a ANSYS.....	- 133 -
6.1.2.	Interface gráfico del usuario.....	- 137 -
6.1.3.	Pasos a seguir para la resolución de un problema .....	- 140 -
6.1.3.1.	Preproceso .....	- 140 -
6.1.3.2.	Solución.....	- 150 -
6.1.3.3.	Postproceso.....	- 157 -
6.2.	CARACTERIZACIÓN Y RESOLUCIÓN DE LOS MODELOS .....	- 157 -
6.2.1.	Introducción .....	- 157 -
6.2.2.	Modelo estático .....	- 158 -
6.2.2.1.	Definición, diseño y caracterización del modelo .....	- 158 -
6.2.2.2.	Resolución del problema .....	- 163 -
6.2.3.	Modelo dinámico.....	- 165 -
6.2.3.1.	Definición, diseño y caracterización del modelo .....	- 165 -
6.2.3.2.	Resolución del problema .....	- 171 -
6.3.	PARAMETRIZACIÓN DE LOS MODELOS.....	- 174 -
6.3.1.	Introducción .....	- 174 -

6.3.2.	Proceso de parametrización.....	- 174 -
6.3.3.	Resultado del proceso de parametrización .....	- 176 -

## **CAPÍTULO 7: Resultados**

7.1.	OBTENCION DE RESULTADOS .....	- 177 -
7.2.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	- 182 -
7.2.1.	Resultados del modelo estático .....	- 182 -
7.2.1.1.	Análisis de deformación del modelo .....	- 182 -
7.2.1.2.	Análisis de tensiones del modelo .....	- 183 -
7.2.2.	Resultados del modelo dinámico.....	- 186 -
7.2.2.1.	Análisis de tensiones del modelo .....	- 186 -

## **CAPÍTULO 8: Conclusiones**

8.1.	CONCLUSIONES .....	- 191 -
------	--------------------	---------

## **CAPÍTULO 9: Trabajos futuros**

9.1.	TRABAJOS FUTUROS .....	- 194 -
------	------------------------	---------

	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	- 196 -
--	----------------------------------	---------

## Índice de figuras

Figura 1. Etapas en el diseño de un producto.....	- 18 -
Figura 2. Ejemplos de programas que utilizan el MEF.....	- 19 -
Figura 3. Ejemplo de colapso de una torre de enfriamiento.....	- 30 -
Figura 4. Ejemplo de domo hemisférico en recipiente a presión. ....	- 30 -
Figura 5. Ejemplo de verificación de boquilla en tanque atmosférico. ....	- 31 -
Figura 6. Ejemplo de modelo óseo.....	- 31 -
Figura 7. Ejemplo de estabilidad estructural y pandeo en una viga. ....	- 32 -
Figura 8. Ejemplo de cálculo de frecuencias y modos propios de vibración. ....	- 32 -
Figura 9. Elementos de una banda transportadora. ....	- 34 -
Figura 10. Tipos de ondas en bandas termoplásticas. ....	- 38 -
Figura 11. Dibujo esquemático de las bandas modulares. ....	- 40 -
Figura 12. Tipos de mallado en bandas metálicas con arrastre por rodillos.....	- 42 -
Figura 13. Tipos de mallado en bandas metálicas con arrastre por rodillos.....	- 42 -
Figura 14. Refuerzos laterales en bandas de teflón. ....	- 44 -
Figura 15. Corchetes en las bandas de teflón. ....	- 44 -
Figura 16. Tipos de refuerzos interiores metálicos en bandas plásticas.....	- 45 -
Figura 17. Esquema general de la banda tipo tubo.....	- 46 -
Figura 18: Ángulo de sobrecarga del material ( $\beta$ ).....	- 50 -
Figura 19: Esquema geométrico de una banda transportadora.....	- 56 -
Figura 20. Rodillos en terna. ....	- 61 -
Figura 21. Rodillos en bina. ....	- 62 -
Figura 22. Rodillo plano.....	- 62 -
Figura 23. Coeficiente de fricción $C$ en función de la longitud de la banda. ....	- 67 -
Figura 24. Esquema de un plano inclinado con carga.....	- 74 -
Figura 25. Tensión efectiva.....	- 81 -

Figura 26. Diagrama de tensiones principales en la banda transportadora. ....	- 82 -
Figura 27. Flecha o pandeo permisible de la banda. ....	- 88 -
Figura 28. Carcasa de la banda plástica con refuerzo interior metálico. ....	- 90 -
Figura 29. Estructura interna de la banda textil. ....	- 91 -
Figura 30. Rollo de banda. ....	- 98 -
Figura 31. Distancia entre apoyos del tambor. ....	- 105 -
Figura 32. Editor de Visual Basic en Microsoft Excel. ....	- 108 -
Figura 33. Ejemplo de un Formulario de Microsoft Excel. ....	- 109 -
Figura 34. Ejemplo de un Useform. ....	- 110 -
Figura 35. Cuadro de herramientas de un Useform. ....	- 111 -
Figura 36. 1ª pestaña del software: Portada. ....	- 114 -
Figura 37. 2ª pestaña del software: Material. ....	- 115 -
Figura 38. Ventana de información de propiedades de materiales. ....	- 116 -
Figura 39. 3ª pestaña del software: Geometría. ....	- 116 -
Figura 40. Ventana de información de anchos de banda normalizados. ....	- 117 -
Figura 41. Ventana de información de velocidades de banda normalizadas. ....	- 118 -
Figura 42. 4ª pestaña del software: Fuerzas y Potencias. ....	- 118 -
Figura 43. Pesos de bandas recomendado. ....	- 119 -
Figura 44. Pesos de rodillos superiores e inferiores recomendados. ....	- 120 -
Figura 45. Espaciamientos recomendados en rodillos superiores e inferiores. ....	- 120 -
Figura 46. 5ª pestaña del software: Tensiones. ....	- 121 -
Figura 47. 6ª pestaña del software: Motor. ....	- 122 -
Figura 48. 7ª pestaña del software: Rodillos. ....	- 122 -
Figura 49. Diámetros de rodillos normalizados y recomendados. ....	- 123 -
Figura 50. 8ª pestaña del software: Tambores. ....	- 123 -
Figura 51. 9ª pestaña del software: Banda. ....	- 124 -
Figura 52. Espesores de recubrimientos de banda recomendados. ....	- 125 -

Figura 53. Espesores de carcasa recomendados para bandas textiles tipo EP.....	- 125 -
Figura 54. Espesores de carcasa recomendados para bandas tipo ST. ....	- 126 -
Figura 55. 10ª pestaña del software: Resultados. ....	- 127 -
Figura 56. ANSYS, Inc. ....	- 133 -
Figura 57. Interface de ANSYS, Inc. ....	- 134 -
Figura 58. Interface de usuario de ANSYS. ....	- 137 -
Figura 59. Ventana Output de ANSYS. ....	- 139 -
Figura 60. Cuadro de preferencias ANSYS. ....	- 140 -
Figura 61. Cuadro de diálogo para elementos seleccionados. ....	- 141 -
Figura 62. Cuadro de diálogo para la selección de elementos. ....	- 142 -
Figura 63. Cuadro de diálogo de las constantes reales de cada elemento. ....	- 143 -
Figura 64. Cuadro de diálogo de las constantes reales del elemento BEAM 161. ....	- 144 -
Figura 65. Cuadro de diálogo para materiales. ....	- 144 -
Figura 66. Cuadro de diálogo para propiedades de los materiales. ....	- 145 -
Figura 67. Menú para la creación del modelo. ....	- 146 -
Figura 68. Cuadro de diálogo para la selección de objetos. ....	- 148 -
Figura 69. Cuadro de diálogo para la selección de elementos. ....	- 149 -
Figura 70. Cuadro de diálogo para definir características de elementos. ....	- 149 -
Figura 71. Ventana para seleccionar el tamaño de mallado. ....	- 150 -
Figura 72. Cuadro de diálogo de restricción de movimientos. ....	- 151 -
Figura 73. Cuadro de diálogo de velocidades iniciales. ....	- 152 -
Figura 74. Cuadro de diálogo de definición de parámetros de contacto. ....	- 153 -
Figura 75. Cuadro de diálogo de parámetros. ....	- 154 -
Figura 76. Cuadro de diálogo de definición de un vector de parámetros. ....	- 154 -
Figura 77. Cuadro de diálogo de definición de cargas. ....	- 155 -
Figura 78. Cuadro de diálogo para definición del tiempo de simulación. ....	- 156 -
Figura 79. Menú del postproceso. ....	- 157 -



Figura 80. Elemento tipo SHELL181. ....	- 159 -
Figura 81. Modelo de banda con rodillos.....	- 161 -
Figura 82. Mallado del modelo. ....	- 162 -
Figura 83. Visualización de las restricciones. ....	- 163 -
Figura 84. Visualización de cargas. ....	- 164 -
Figura 85. Elemento tipo SHELL163. ....	- 166 -
Figura 86. Modelo de banda con tambor.....	- 167 -
Figura 87. Mallado del modelo. ....	- 168 -
Figura 88. Visualización de las partes.....	- 169 -
Figura 89. Visualización de los Componentes. ....	- 170 -
Figura 90. Visualización de las restricciones. ....	- 172 -
Figura 91. Visualización de las cargas.....	- 173 -
Figura 92. Hoja Excel para análisis estático.....	- 175 -
Figura 93. Ejemplo de archivo de texto para análisis estático de la banda. ....	- 176 -
Figura 94. 10ª pestaña del software: Resultados. ....	- 178 -
Figura 95. Deformada del modelo.....	- 182 -
Figura 96. Deformada del modelo vista frontal. ....	- 183 -
Figura 97. Distribución de tensiones según el eje X. ....	- 184 -
Figura 98. Distribución de tensiones según el eje Y. ....	- 184 -
Figura 99. Distribución de tensiones según el eje Z.....	- 185 -
Figura 100. Distribución de tensión de Von Mises. ....	- 185 -
Figura 101. Cuadro de opciones de animación. ....	- 187 -
Figura 102. Resumen de la animación. ....	- 188 -
Figura 103. Resumen de la animación en vista frontal. ....	- 189 -

## Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las bandas dependiendo de su posición. ....	- 35 -
Tabla 2. Clasificación de las bandas de caucho. ....	- 36 -
Tabla 3. Clasificación de las bandas termoplásticas. ....	- 37 -
Tabla 4. Sistemas de unión en bandas termoplásticas. ....	- 38 -
Tabla 5. Materiales y propiedades de las bandas modulares. ....	- 40 -
Tabla 6. Materiales de las bandas de malla metálica. ....	- 41 -
Tabla 7. Materiales y acabados de las bandas de teflón. ....	- 43 -
Tabla 8: Características de algunos materiales. ....	- 52 -
Tabla 9: Ancho de banda recomendado en función del tamaño de grano. ....	- 58 -
Tabla 10: Velocidad de banda recomendada en función del tamaño de grano. ....	- 59 -
Tabla 11. Factor ( $k$ ) debido a la inclinación de la banda. ....	- 64 -
Tabla 12. Coeficiente de fricción ( $f$ ) de las partes giratorias. ....	- 66 -
Tabla 13. Espaciamiento entre rodillos recomendado. ....	- 68 -
Tabla 14. Peso de la banda recomendado. ....	- 69 -
Tabla 15. Peso de rodillos recomendado. ....	- 69 -
Tabla 16. Factor de ajuste $K_1$ debido al tamaño de grano del material. ....	- 71 -
Tabla 17. Potencia adicional requerida debida a carros descargadores (trippers). ....	- 78 -
Tabla 18. Eficiencia mecánica de equipos reductores de velocidad. ....	- 80 -
Tabla 19. Ángulos de contacto y coeficiente de fricción entre tambor y banda. ....	- 83 -
Tabla 20. Diámetro máximo del cordón en una banda metálica. ....	- 91 -
Tabla 21. Letras identificativas de materiales. ....	- 92 -
Tabla 22. N° de lonas y espesores de carcasa en bandas textiles EP. ....	- 94 -
Tabla 23. Espesores del recubrimiento superior de la banda. ....	- 96 -
Tabla 24. Espesores del recubrimiento inferior de la banda. ....	- 96 -
Tabla 25. Diámetros de rodillos recomendados. ....	- 102 -

Tabla 26. Diámetros de tambores recomendados.....	- 104 -
Tabla 27. Distancia entre apoyos del tambor. ....	- 105 -
Tabla 28. Constantes reales de elementos. ....	- 159 -
Tabla 29. Propiedades de los materiales del modelo estático. ....	- 161 -
Tabla 30. Constantes reales de elementos. ....	- 166 -
Tabla 31. Propiedades de los materiales del modelo dinámico.....	- 167 -
Tabla 32. Valores parametrizados.....	- 174 -
Tabla 33. Informe resumen de la banda transportadora calculada. ....	- 179 -

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un avance enorme en el diseño, modelado y simulación de elementos mecánicos a través de la informática, gracias sobre todo a la forma en que ésta facilita la realización de los diseños, el estudio del comportamiento de sistemas mecánicos bajo la acción de cargas, la elección de los materiales adecuados, etc.

Como consecuencia de la introducción de las herramientas computacionales en el mundo del diseño, se ha logrado la creación de sistemas mecánicos de una forma mucho más eficiente. De esta forma, se puede analizar el comportamiento que tendrán antes de su fabricación, detectando cualquier anomalía en su funcionamiento, corrigiéndolo y evitando así que estos problemas aparezcan en fases más avanzadas del proceso, donde serían mucho más difíciles y costosos de solucionar. En este contexto, existen diversos programas informáticos dedicados al estudio y diseño de elementos estructurales y mecánicos.

De esta forma, actualmente la computación ofrece de una manera rápida y precisa un inmenso abanico de posibilidades a la hora de diseñar y simular el comportamiento de cualquier máquina o sistema mecánico, calculando y recreando situaciones que de otro modo resultarían muy costosas o incluso imposibles. Es este gran potencial y capacidad de estudio los que han motivado la creación del presente documento.

De este modo y como podrá comprobarse más adelante, en el proyecto se ha utilizado un programa de elementos finitos junto con una aplicación informática o software previamente diseñado y programado. Se ha creado un sistema de comunicación entre los dos programas mediante la parametrización de los valores necesarios con el objetivo de crear un software de diseño de una banda transportadora, incluyendo en la fase final un completo análisis mediante la implementación del programa de elementos finitos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado, la estructura del proyecto dividida en bloques o capítulos es la que puede verse a continuación:

CAPITULO 2: En este capítulo se expondrán los objetivos que persigue el presente documento, dando una explicación clara y concisa de cada uno de ellos.

CAPITULO 3: En este bloque se realizará un estudio del “Estado del Arte”, donde se describirán las principales características y aplicaciones de los programas de análisis mediante MEF (Método de elementos finitos) así como de las bandas transportadoras, incluyendo una descripción detallada de sus componentes, tipos, funciones y aplicaciones.

CAPITULO 4: Se detallarán los diferentes pasos y operaciones matemáticas que hay que realizar en el diseño de una banda transportadora, desde los primeros cálculos iniciales relacionados con el material a transportar, hasta las fases finales de diseño en las que se definirán los tambores y rodillos que habrá que incluir en la instalación así como el tipo de banda.

CAPITULO 5: En este capítulo se explicará en qué consiste el lenguaje de programación VBA (*Visual Basic for Applications*) así como su utilización y relación computacional con Microsoft Excel. Se abordarán cada una de las macros (conjunto de instrucciones de código que permiten realizar una tarea determinada) que se han programado para poder crear el software de diseño de la banda transportadora a partir de los cálculos obtenidos en el capítulo anterior.

CAPITULO 6: Este capítulo se centrará en el análisis de elementos finitos de la banda transportadora mediante la utilización del programa ANSYS. Se detallarán los pasos seguidos en la creación del modelo de la banda y se explicará el método o sistema diseñado para lograr la parametrización y comunicación entre los dos programas utilizados, Visual Basic a través de Microsoft Excel y ANSYS, Inc.

CAPITULO 7: En este capítulo se expondrá el método de obtención de resultados así como su interpretación y utilidades.

CAPITULO 8: Este apartado se centrará en las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del proyecto, comentándolas y comparándolas con los objetivos iniciales del trabajo.

CAPITULO 9: En el último capítulo se expondrán todos los trabajos futuros y posibles modificaciones del proyecto que no se han llevado a cabo pero que se considera que podrían resultar interesantes en futuros estudios.

# CAPITULO 2

## OBJETIVOS DEL PROYECTO

### 2.1. OBJETIVOS

La realización de este trabajo persigue un objetivo fundamental que puede resumirse de la siguiente forma:

- La creación de un software de diseño de una banda transportadora a partir de unos datos iniciales conocidos incluyendo un análisis de elementos finitos. Para ello se buscará crear un sistema de comunicación eficaz entre dos potentes herramientas de trabajo que ofrece la informática actual: Microsoft Excel (junto con Visual Basic) y ANSYS, Inc.

Para conseguir alcanzar este objetivo, en la primera parte del proyecto se explicarán las operaciones matemáticas necesarias para el cálculo de una banda

transportadora así como los pasos que se han seguido para programar el software de diseño de la instalación.

En un segundo bloque se explicará el proceso de diseño del modelo de elementos finitos explicando cada uno de los pasos que se han tenido que dar y las bases y motivos en los que se sustentan. A continuación, se realizará la simulación de cada uno de los puntos del sistema que se han considerado críticos.

Por último, y una vez que se conozcan todos los valores arrojados por el análisis del ensayo, serán expuestos los resultados del mismo, discutidas las ventajas y limitaciones de los códigos matemáticos utilizados en estudios de este tipo así como el tiempo de simulación necesario para completar estas pruebas.



# **CAPITULO 3**

## **ESTADO DEL ARTE**

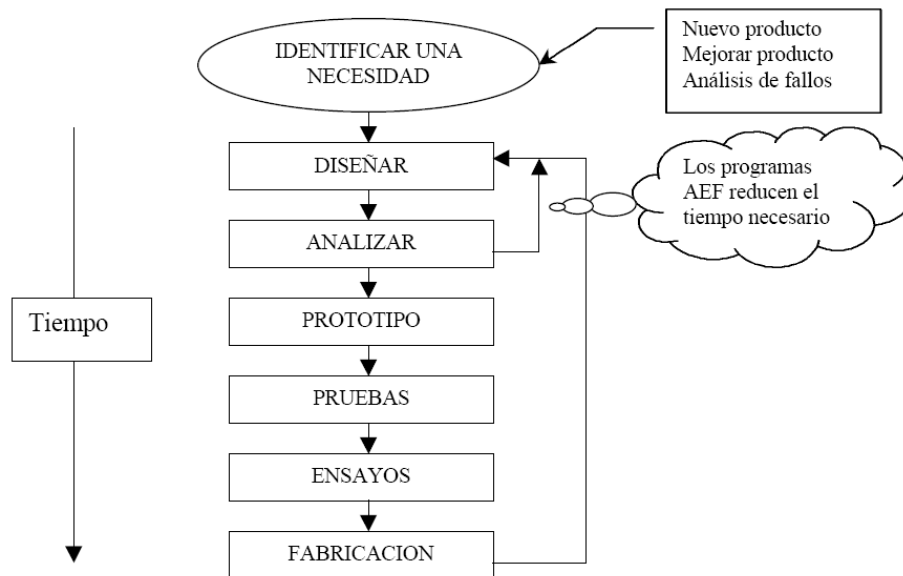
### **3.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)**

#### **3.1.1. Introducción**

Los programas de MEF (método de elementos finitos), permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales.

En Ingeniería, la mayoría de los procesos están definidos de esta forma, por lo que dichos programas permitirán obtener productos de calidad superior a un menor coste, mejorar procesos existentes, estudiar el fallo de un componente estructural o un equipo, etc.

La utilización de un programa MEF puede ayudar a reducir el tiempo total de desarrollo de un producto, disminuyendo el número de ciclos prototipo-pruebas-ensayos-evaluación (Figura 1). Además, en algunos casos no es deseable o práctico el realizar un prototipo: aplicaciones biomecánicas, aeroespaciales, etc.



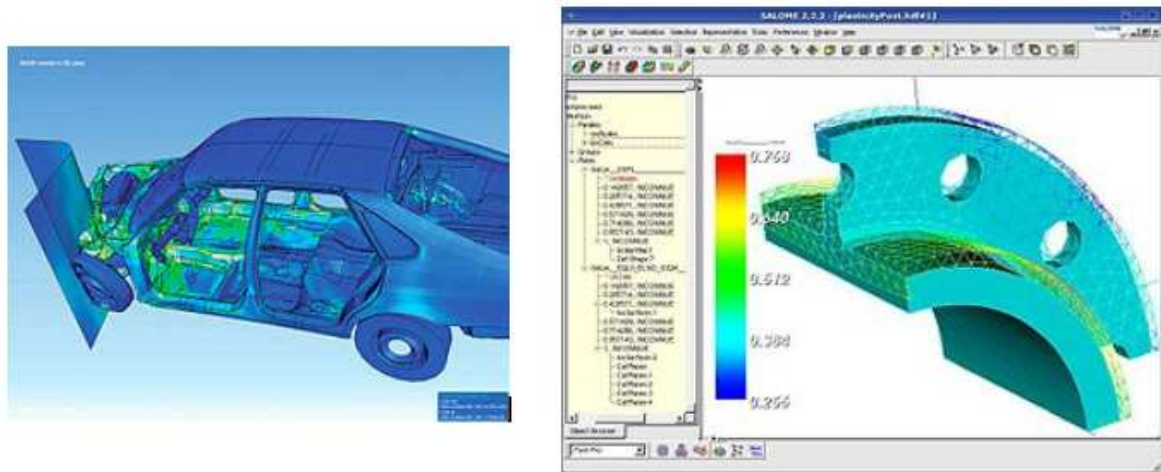
**Figura 1.** Etapas en el diseño de un producto.

En la actualidad existen numerosos programas de análisis por elementos finitos, tales como: ABAQUS, ANSYS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, CAEPIPE, etc. [1].

### 3.1.2. El análisis por elementos finitos y el método de los elementos finitos.

El análisis por elementos finitos (AEF) es un procedimiento de simulación por ordenador que se basa en una técnica numérica llamada método de los elementos finitos (MEF).

El método de los elementos finitos (MEF en castellano ó FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física (Figura 2).



**Figura 2.** Ejemplos de programas que utilizan el MEF.

### 3.1.2.1. Resumen histórico

Cuando se produce la llegada de los primeros ordenadores en la década de los 50, el cálculo de estructuras se encontraba en un punto en el que los métodos de cálculo predominantes consistían en técnicas de iteración (métodos de Cross y Kani) que se realizaban de manera manual y por tanto resultaban bastante tediosos. El cálculo de una estructura de edificación de varios pisos, por ejemplo, podía llevar varias semanas, lo cual suponía un coste sustancial de tiempo en detrimento de la posibilidad de invertir este en la optimización de la estructura.

La llegada de la computadora permitió el resurgimiento del método de los desplazamientos ya conocidos en siglos anteriores (Navier, Lagrange, Cauchy), pero que era difícil de aplicar dado que al final conducía a la resolución de enormes sistemas de ecuaciones inabordables desde el punto de vista manual.

El Método de Elementos Finitos (MEF) fue desarrollado en 1943 por R. Courant, quien utilizó el método Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo para obtener soluciones aproximadas a un sistema de vibración. Poco después, un documento publicado en 1956 por M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp estableció una definición más amplia del análisis numérico. El documento se centró en “la rigidez y deformación de estructuras complejas”.

Con la llegada de los primeros ordenadores se instaura el cálculo matricial de estructuras. Éste parte de la discretización de la estructura en elementos lineales tipo barra de los que se conoce su rigidez frente a los desplazamientos de sus nodos. Se plantea entonces un sistema de ecuaciones resultado de aplicar las ecuaciones de equilibrio a los nodos de la estructura. Este sistema de ecuaciones se esquematiza de la siguiente manera:

$$(P) = [k] \cdot (u)$$

Donde las incógnitas son los desplazamientos en los nodos (vector  $u$ ) que se hallan a partir de las fuerzas en los nodos (vector  $P$ ) y de la rigidez de las barras (matriz de rigidez  $k$ ). Conocidos dichos desplazamientos es posible determinar los esfuerzos en las barras. La solución obtenida es exacta.

Para la resolución de los sistemas de ecuaciones se potencia el estudio de la adaptabilidad de los algoritmos ya conocidos (Gauss, Cholesky, Crout, gradiente conjugado, etc). El ahorro de tiempo es incalculable y con ello el uso del método matricial se extiende. Este desarrollo se hace especialmente notable en estructuras de edificación donde la discretización de los pórticos en barras es prácticamente inmediata a partir de las vigas y pilares.

Sin embargo, y a pesar de desarrollarse modelizaciones de elementos superficiales mediante barras (losas con emparrillados, elementos curvos mediante aproximaciones de elementos rectos, etc.), se plantean grandes dificultades ante estructuras continuas (superficies y volúmenes) y con geometrías complejas. De ahí que sea precisamente dentro del campo aeroespacial donde comiencen a desarrollarse las nuevas técnicas del MEF. La demanda de la NASA repercutió en el desarrollo del software de elementos finitos NASTRAN en 1965. Dada su generalidad el método se amplió a otros campos no estructurales como la conducción de calor, la mecánica de fluidos, etc.

Con la llegada de los centros de cálculo y los primeros programas comerciales en los años 60, el MEF se populariza en la industria a la vez que refuerza sus bases teóricas en los centros universitarios.

En los años 70 se produce un gran crecimiento de la bibliografía así como la extensión del método a otros problemas como los no lineales. En esta década, el MEF estaba limitado a caros ordenadores centrales generalmente poseídos por las industrias aeronáuticas, de automoción, de defensa y nucleares. Se estudian nuevos tipos de elementos y se sientan las bases matemáticas rigurosas del método, que había aparecido antes como técnica de la ingeniería que como método numérico de la matemática.

Por último, a partir de la década de los 80, con la generalización de los ordenadores personales se extiende el uso de los programas comerciales que se especializan en los diversos campos, instaurándose el uso de pre y postprocesadores gráficos que realizan el mallado y la representación gráfica de los resultados. Se continúa en el estudio de la aplicación del método a nuevos modelos de comportamiento (plasticidad, fractura, daño continuo, etc.) y en el análisis de los errores. En la actualidad dentro del campo estructural el MEF comparte protagonismo con el método matricial, siendo muchos los programas que mezclan el análisis por ambos métodos debido sobre todo a la mayor necesidad de memoria que requiere el análisis por elementos finitos. De este modo, se ha dejado la aplicación del MEF para el análisis de elementos continuos tipo losa ó pantalla, mientras que los pórticos siguen todavía discretizándose en barras y utilizando el método matricial. Desde el rápido declive en el coste de los ordenadores y el fenomenal incremento en la potencia de cálculo, el MEF ha desarrollado una increíble precisión. A día de hoy, los superordenadores son capaces de dar resultados exactos para todo tipo de parámetros [2].

### **3.1.2.2. Qué es y en qué consiste el MEF**

El MEF se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una

partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «mall».

Los cálculos se realizan sobre una mall» o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mall»s, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad, se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas, las deformaciones y tensiones respectivamente cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables, o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy utilizado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Por tanto, el MEF consiste en un modelo informático del material o diseño que es tensado y analizado para conseguir resultados específicos. Es utilizado en el diseño de nuevos productos y en la mejora de los actuales.

Hay generalmente dos tipos de análisis que son utilizados en la industria: modelos en 2D y en 3D. Mientras los modelos en 2D conservan la simplicidad y permiten que el análisis se realice en un ordenador normal, tiende a dar resultados menos precisos. El modelado en 3D, sin embargo, produce resultados más precisos mientras sacrifica la habilidad para funcionar de manera efectiva en cualquier ordenador. Con cada uno de estos esquemas modelados, el programador puede insertar numerosos algoritmos ó funciones que pueden hacer al sistema comportarse de manera lineal o no lineal. Los sistemas lineales son menos complejos y normalmente no tienen en cuenta deformaciones plásticas. Los sistemas no lineales consideran las deformaciones plásticas y algunos incluso son capaces de testear el material hasta la fractura.

### **3.1.2.3. Cómo trabaja el MEF**

Como se comento anteriormente, el MEF utiliza un complejo sistema de puntos llamados nodos que hacen una red llamada malla. Esta malla está programada para contener el material y las propiedades de la estructura que definen cómo reaccionará ante ciertas condiciones de carga. A los nodos se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de estrés anticipado en un área. Las regiones que vayan a recibir gran cantidad de estrés tendrán normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimenten poca o ninguna. Los puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente testeados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos y áreas de elevado estrés. La malla actúa de manera que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

Básicamente los pasos a seguir en el análisis de estructuras mediante el método de los desplazamientos a través del MEF son:

1. El continuo se divide mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante

algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de preproceso.

2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o “nodos”, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.

3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.

Por ejemplo el campo de desplazamientos dentro de un elemento lineal de dos nodos viene definido por:

$$u = N1.u1 + N2.u2$$

, siendo N1 y N2 las funciones comentadas (funciones de forma) y u1 y u2 los desplazamientos en el nodo 1 y en el nodo 2.

4. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.

5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma  $F = k \cdot u$ , que como puede comprobarse es similar a la del cálculo matricial.

6. La resolución del sistema anterior permite obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.



7. En la etapa de postproceso se presentan los resultados, generalmente de forma gráfica para su análisis.

Estos siete pasos representan las bases desde un punto de vista interno referido al cálculo (es decir, la base del MEF), pero por otro lado se puede decir que existen tres fases a la hora de realizar un análisis por elementos finitos, siendo las que se muestran a continuación:

1. Pre-proceso. Definir el modelo de elementos finitos y los factores ambientales que influyen en él.
2. Solución del análisis. Solucionar el modelo de elementos finitos.
3. Post-proceso. Mostrar los resultados utilizando herramientas de visualización.

1. Pre-proceso: El primer paso en el MEF, pre-proceso, es construir un modelo de elementos finitos de la estructura que va a ser analizada. En muchos paquetes de MEF se requiere una descripción topológica de las características geométricas de la estructura. Ésta puede ser 1D, 2D, o 3D. El objetivo principal del modelo es reflejar de manera realista los parámetros importantes y características del modelo real. La manera más sencilla para conseguir similitud en el análisis es utilizar planos pre existentes, modelos CAD. Una vez que se ha creado la geometría, se utiliza un procedimiento para definir y dividir el modelo en pequeños elementos.

En general, los paquetes de MEF enumeran los nodos como una herramienta de identificación. Los elementos están determinados por conjuntos de nodos, y definen propiedades localizadas de masa y rigidez. Los elementos también están definidos por la numeración de la malla, la cual permite referenciar la correspondiente deflexión o esfuerzo (en análisis estructural) para una localización específica.

2. Análisis (cómputo de la solución): En la siguiente etapa del proceso de análisis de elementos finitos, se lleva a cabo una serie de procesos computacionales que involucran fuerzas aplicadas y propiedades de los elementos.

3. Post-proceso (visualización): Estos resultados pueden ser estudiados utilizando herramientas visuales dentro del ambiente de MEF para ver e identificar completamente las implicaciones del análisis. Herramientas numéricas y gráficas permiten la localización precisa de información como esfuerzos y deformaciones [2].

El MEF se ha vuelto una solución para predecir fallos debidos a tensiones desconocidas mostrando la distribución de tensiones en el material y permitiendo a los diseñadores ver todas las tensiones teóricas involucradas.

Las grandes ventajas de estos cálculos se pueden resumir en:

- Hace posible el cálculo de estructuras que, bien por el gran número de operaciones que su resolución presentaba ó por lo tedioso que resulta su diseño, eran en la práctica inabordables mediante el cálculo manual.
- En la mayoría de los casos reduce a límites despreciables el riesgo de errores operatorios, teniendo en cuenta la dificultad que presenta estimar la incertidumbre de los resultados [3].

#### **3.1.2.4. Tipos de análisis ingenieriles**

- Análisis estructural: consiste en modelos lineales y no lineales. Los modelos lineales utilizan simples parámetros y asumen que el material no es deformado plásticamente. Los modelos no lineales consisten en tensionar el material más allá de sus capacidades elásticas de forma que la tensión en el material varía con la cantidad de deformación.

- Análisis vibracional: utilizado para probar un material contra vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada uno de estos incidentes puede actuar en la frecuencia natural del material pudiendo causar resonancia y el consecuente fallo.

- Análisis de fatiga: ayuda a los diseñadores a predecir la vida del material o de la estructura, mostrando el efecto de los ciclos de carga sobre la pieza. Este análisis

puede calcular las áreas donde es más probable que se produzca propagación de la grieta. El fallo por fatiga puede también evaluar la tolerancia al fallo del material.

- Análisis térmico: estudian los modelos de análisis de transferencia de calor por conductividad o por dinámicas térmicas de flujo del material.

### **3.1.2.5. Opciones que presentan los programas MEF**

Un amplio rango de funciones objetivo (variables con el sistema) está disponible para su caracterización:

- Masa, volumen, temperatura.
- Energía tensional, estrés tensional.
- Fuerza, desplazamiento, velocidad, aceleración.
- Sintético (definidos por el usuario).

Hay múltiples condiciones de carga que se pueden aplicar al sistema. Algunos ejemplos son:

- Estáticas: Puntual, presión, térmica, gravedad y carga centrífuga.
- Cargas térmicas de soluciones del análisis de transmisión de calor.
- Desplazamientos forzados.
- Flujo de calor y convección.
- Dinámicas: Puntuales, presión y cargas de gravedad.

Cada programa MEF suele incluir una librería de elementos. Algunos ejemplos de elementos son:

- Elementos tipo barra.
- Elementos tipo viga.

- Placa/Cáscara/Elementos compuestos.
- Panel de sándwich.
- Elementos sólidos.
- Elementos tipo muelle.
- Elementos de masa.
- Elementos rígidos.
- Elementos amortiguadores viscosos.

Muchos programas MEF también están equipados con la capacidad de trabajar con múltiples materiales en la estructura, tales como:

- Isotrópicos, homogéneos.
- Ortotrópicos, idénticos a 90 grados.
- Anisotropía general, heterogéneos.

#### **3.1.2.6. Aplicación del AEF a la ingeniería mecánica**

Una gran variedad de especializaciones bajo el ámbito de la ingeniería mecánica tales como la aeronáutica, biomecánica o industria automotriz utilizan comúnmente el análisis de elementos finitos en el diseño y desarrollo de sus productos. Varios paquetes modernos de AEF incluyen componentes específicos para este tipo de áreas o sectores de trabajo tales como el térmico (termal), electromagnético, fluido y estructural. Por ejemplo, en una simulación estructural el análisis de elementos finitos ayuda a producir visualizaciones de rigidez y fuerza además de ayudar a minimizar peso, materiales y costos. Este tipo de análisis permite una detallada visualización de donde se doblan o sufren las estructuras indicando la distribución del esfuerzo y los desplazamientos.

Los programas computacionales de análisis de elementos finitos proveen un amplio rango de opciones de simulación para controlar la complejidad del modelado, análisis y resolución del sistema. De forma similar, el nivel deseado de precisión y los

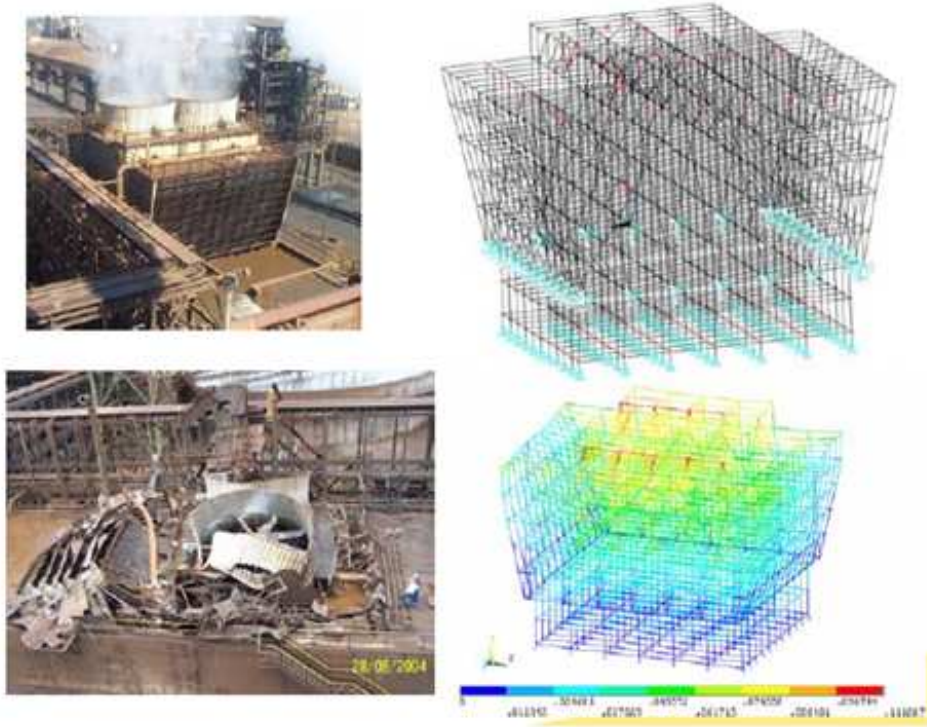
requerimientos de tiempo computacional asociados pueden ser manejados simultáneamente para atender a la mayoría de las aplicaciones de ingeniería.

El análisis de elementos finitos permite el estudio, mejora y optimización de diseños antes de que sean construidos. Esta poderosa herramienta de diseño ha mejorado el estándar de diseños en ingeniería y la metrología del proceso de diseño en muchas aplicaciones industriales, consiguiendo una gran reducción de tiempo en todas las fases previas a la producción o manufactura del producto.

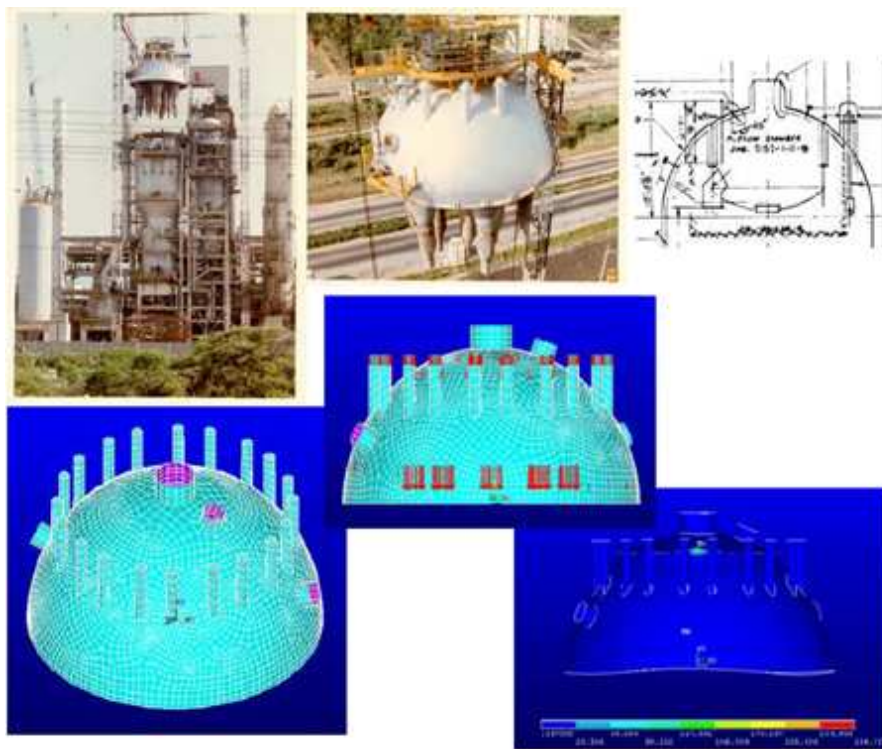
En resumen, los beneficios del análisis de elementos finitos son:

- Alta precisión.
- Diseño mejorado.
- Mejor percepción de los parámetros críticos de diseño.
- Posibilidad de prototipos virtuales.
- Menor cantidad de prototipos reales o hardware.
- Ciclo de diseño más rápido y económico.
- Mejora en la productividad.
- Incremento en los beneficios económicos [3].

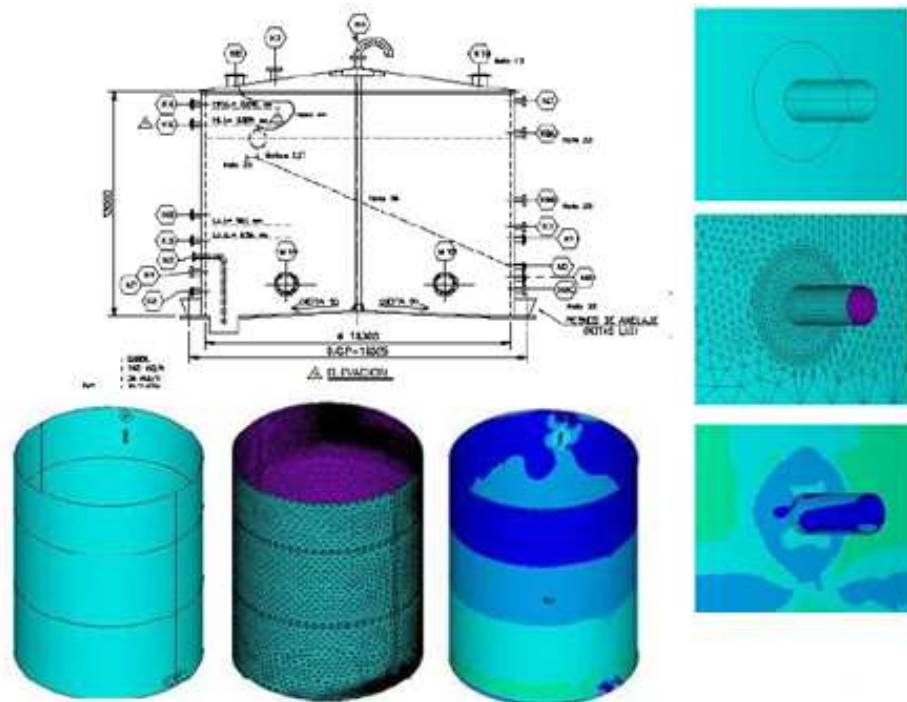
A continuación se muestran varios ejemplos de aplicación del MEF [4].



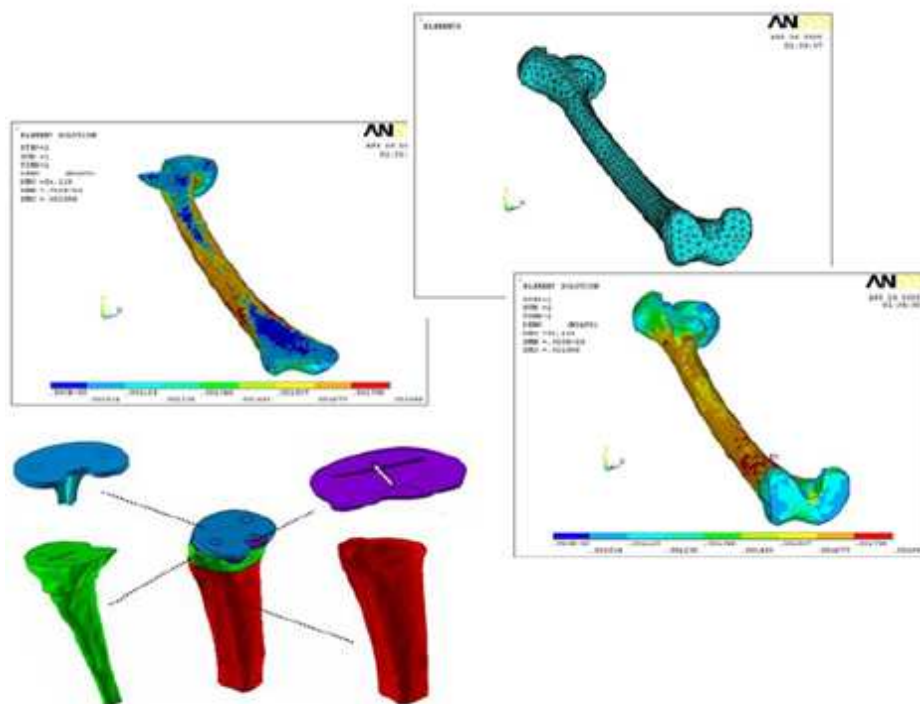
**Figura 3.** Ejemplo de colapso de una torre de enfriamiento.



**Figura 4.** Ejemplo de domo hemisférico en recipiente a presión.

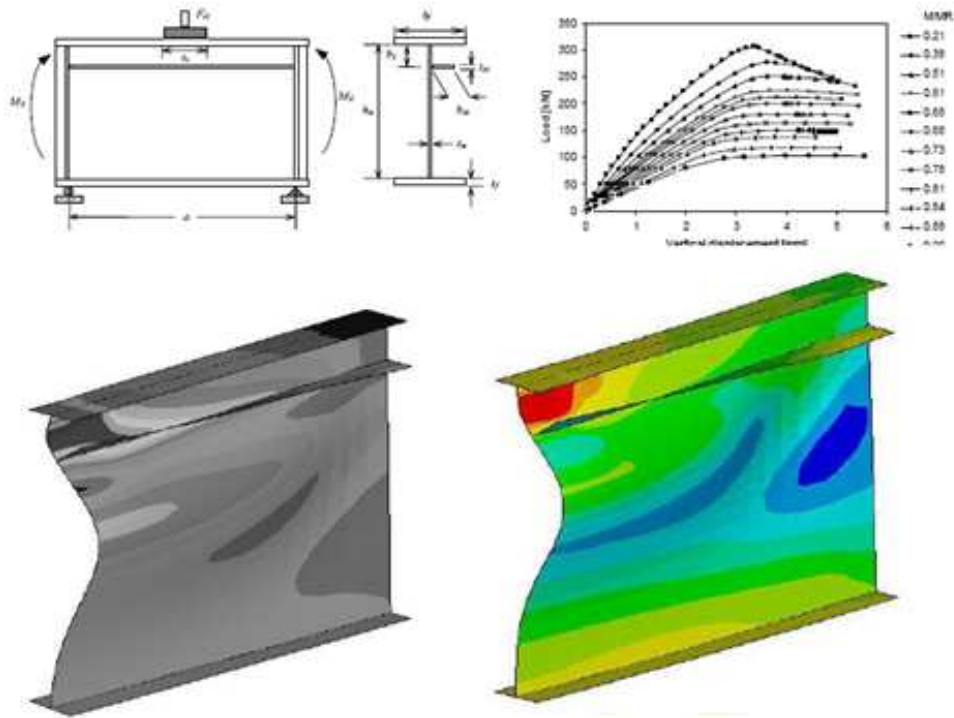


**Figura 5.** Ejemplo de verificación de boquilla en tanque atmosférico.

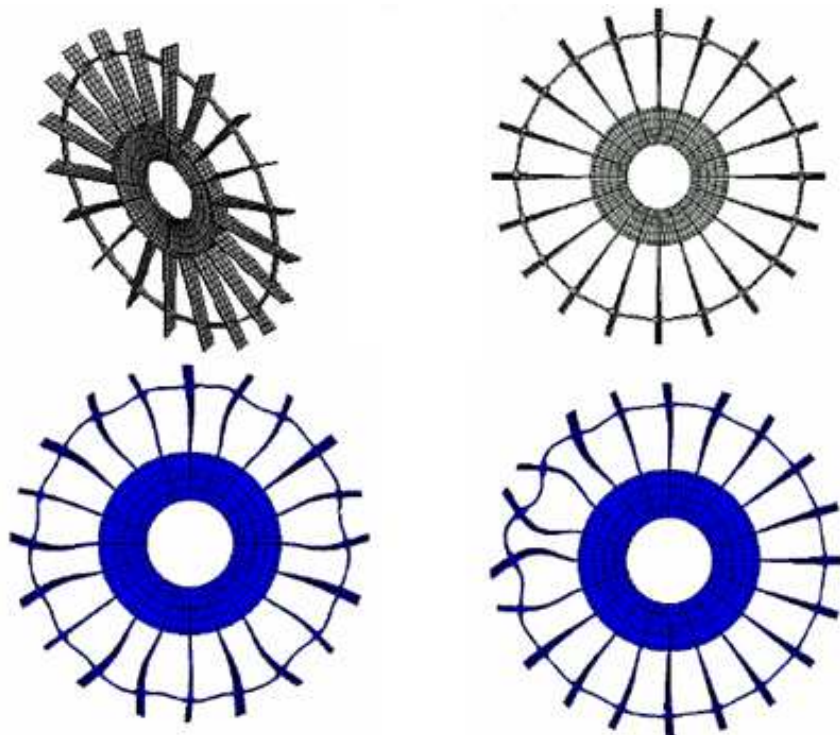


**Figura 6.** Ejemplo de modelo óseo.





**Figura 7.** Ejemplo de estabilidad estructural y pandeo en una viga.



**Figura 8.** Ejemplo de cálculo de frecuencias y modos propios de vibración.



## **3.2. LA BANDA TRANSPORTADORA**

### **3.2.1. Introducción**

Las bandas y rodillos transportadores son elementos auxiliares de las instalaciones cuya misión es la de recibir un producto de forma más o menos continua y conducirlo a otro punto. Son aparatos que funcionan solos, intercalados en las líneas de proceso y que no requieren generalmente ningún operario que manipule directamente sobre ellos de forma continuada.

Se han inventado muchas formas para el transporte de materiales, materias primas, minerales y diversos productos, pero una de las más eficientes es el transporte por medio de bandas y rodillos transportadores, ya que estos elementos son de una gran sencillez de funcionamiento y una vez instalados en condiciones normales suelen dar pocos problemas mecánicos y de mantenimiento.

El transporte de material mediante cintas transportadoras data de aproximadamente el año 1795. La mayoría de estas instalaciones se realizaban sobre terrenos relativamente planos así como en cortas distancias. Aunque el primer sistema de cinta transportadora era muy primitivo, influyó en los ingenieros de forma que empezaron a considerar los sistemas transportadores como un rápido, económico y seguro método para mover grandes volúmenes de material de una localización a otra.

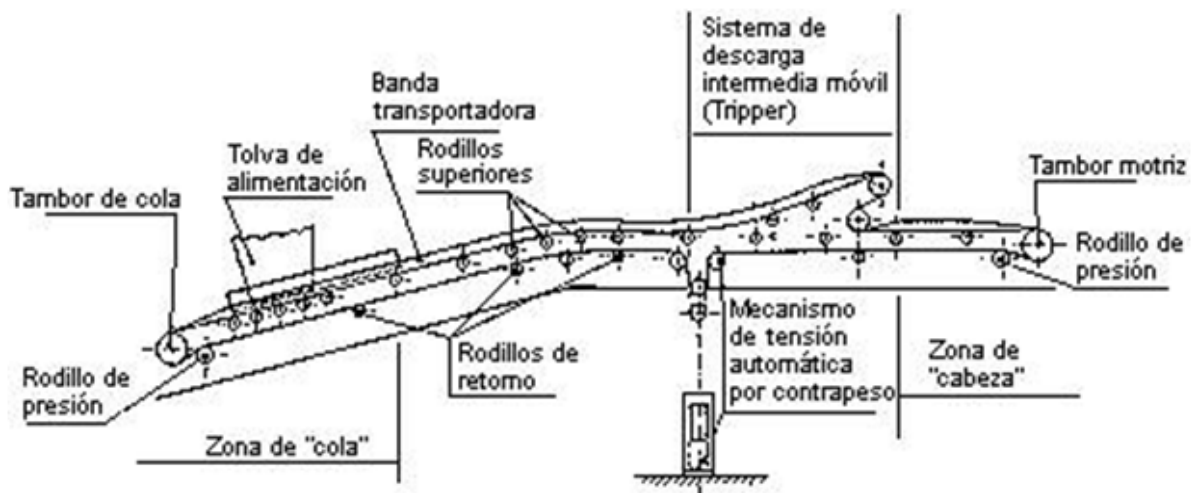
Durante los años 20, la compañía H. C. Frick, demuestra que los transportadores de cinta pueden trabajar sin ningún problema en largas distancias mediante la creación de una instalación que se realizó desde una mina bajo tierra, recorriendo casi 8 kilómetros. La cinta transportadora consistía en múltiples pliegues de algodón con cubierta de goma natural, siendo estos los únicos materiales utilizados en aquellos tiempos destinados a la fabricación de este tipo de bandas. Durante la Segunda Guerra Mundial, los componentes naturales de los transportadores se volvieron muy escasos, permitiendo que la industria de goma se volcara en crear materiales sintéticos que reemplazaran a los naturales [5].

### 3.2.2. Características generales

Las bandas transportadoras son dispositivos para el transporte horizontal o inclinado de objetos sólidos o material a granel cuyas dos ventajas principales son:

- Gran velocidad.
- Grandes distancias (10 km).

La Figura 9 muestra un esquema general de una cinta transportadora. En él se pueden ver los distintos elementos que componen una banda.



**Figura 9.** Elementos de una banda transportadora.

### 3.2.3. Tipos de bandas

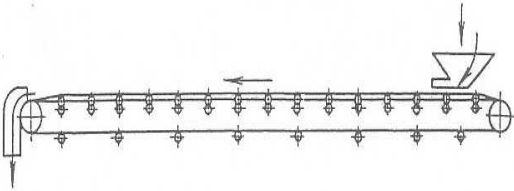

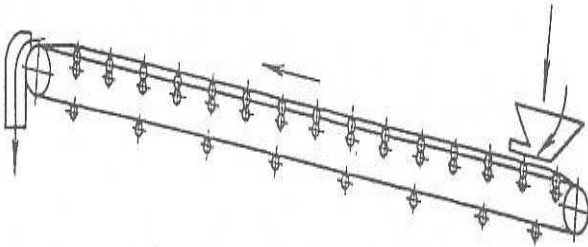

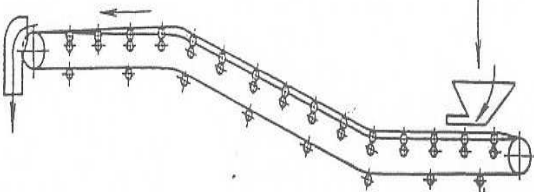

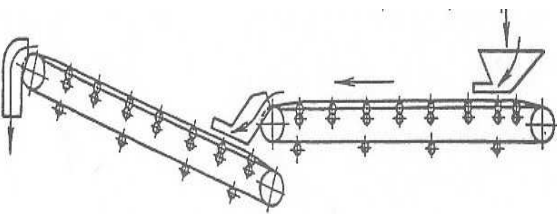

#### 3.2.3.1. Dependiendo de la movilidad

Se denominan cintas fijas aquellas cuyo emplazamiento no puede cambiarse. Por el contrario, las bandas móviles están provistas de ruedas u otros sistemas que permiten un cambio fácil de ubicación. Generalmente se construyen con altura regulable mediante un sistema que permite variar la inclinación de transporte.

### 3.2.3.2. Dependiendo de la posición

En función de la posición en la que se encuentre la banda o las posiciones que ocupen sus diferentes módulos o partes, las cintas transportadoras se clasifican según muestra la Tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación de las bandas dependiendo de su posición.

<b>Horizontal</b>	
	
<b>Inclinada</b>	
	
<b>Horizontal-inclinada- horizontal</b>	
	
<b>Horizontal-inclinada</b>	
	

### 3.2.3.3. Dependiendo del tipo de banda y material a transportar

#### **Bandas de caucho**

Este tipo de bandas se utilizan para el transporte, tanto exterior como interior, de productos y/o materiales a granel, en condiciones desde ligeras hasta muy duras. Las áreas típicas de trabajo para estas bandas son: canteras y movimiento de tierras, minería, puertos de carga y descarga, cerámica y vidrio, cemento y hormigón, piensos y cereales, etc. [ 6 ].

En función de la inclinación requerida y el material transportado se utiliza una de las bandas que se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Clasificación de las bandas de caucho.

INCLINACION	TIPO BANDA	MATERIAL TRANSPORTADO
20°	LISA	Paquetes, fardos y productos a granel.
30°	NERVADA	Productos a granel (secos).
40°	NERVADA	Fardos o productos a granel (húmedos).
40°	RUGOSA	Bultos y paquetería.
70°	CON PERFILES	Productos a granel.
90°	CON PERFILES	Ejecuciones especiales.

#### **Bandas termoplásticas**

Este tipo de bandas son destinadas al transporte interior de productos o materiales no abrasivos en infinidad de aplicaciones, gran parte de ellas en la rama de la alimentación. Por la gran variedad existente, se utilizan en la mayoría de los sectores industriales: hortofrutícola, alimentación, manutención, cerámico, metalúrgico, madera, plástico, farmacéutico, artes gráficas, reciclaje,...

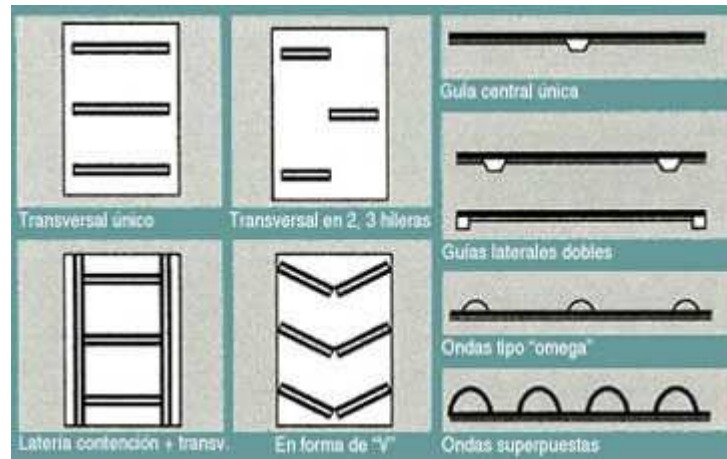
La principal distinción que se puede hacer dentro de esta familia de cintas viene dada por el material empleado en la cobertura, el cual le otorga gran parte de sus cualidades. En función del material de la banda que se utilice se tendrán unas cualidades y rangos de temperaturas permitidos y que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Clasificación de las bandas termoplásticas.

Material	Temperatura	Cualidades
PVC	-5 + 80 °C	Transporte general sin grandes condicionantes
	-15 + 80 °C	Aceites vegetales
	-15 + 80 °C	Aceites vegetales
	-10 + 80 °C	Antiestático. Suele ser anti-llama
Poliuretano	-10 + 80 °C	Bajo coef. fricción. Abrasión. Aceites minerales
	-10 + 90 °C	Bajo coef. fricción. Abrasión. Aceites de tipo vegetal
	-10 + 90 °C	Bajo coef. fricción. Abrasión. Aceites de tipo vegetal
Poliéster	-20 + 100 °C	Tabaco. Bajo coef. fricción. Abrasión
Poliiolefina	-15 + 35 °C	Tabaco. Bajo coef. fricción.
Silicona	-15 + 80 °C	Alto coef. de fricción y poca adherencia producto

Existen también una gran variedad de grabados superficiales que permiten incrementar el ángulo de transporte y la adherencia de la banda con el producto. Este tipo de soluciones se utilizan en determinadas aplicaciones con presencia de polvo o líquidos.


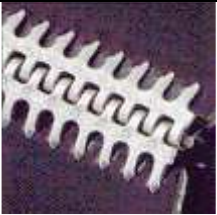

Para impulsar o frenar productos delicados en el transporte tanto horizontal como inclinado, se pueden confeccionar diferentes ondas en la cara exterior de la banda. En función de la altura y la flexibilidad deseada, se elegirá el material y la forma de la onda. La Figura 10 muestra los diferentes tipos de ondas.






**Figura 10.** Tipos de ondas en bandas termoplásticas.

Dependiendo del espesor de banda que se utilice será necesario utilizar un tipo de unión u otro. Como resultado de la elección del mecanismo de unión, se utilizará un diámetro de tambor mínimo y se podrá alcanzar una tensión máxima determinada. En la Tabla 4 se pueden ver reflejados estos valores.

**Tabla 4.** Sistemas de unión en bandas termoplásticas.

	Espesor banda en mm	Ø mínimo de tambor en mm	Tensión máx. en N/mm
	0 a 2	20	-
	0 a 2	20	-
	3 a 6	40	-
	5 a 7	75	-
	0 a 1,6	25	4,3
	2,4 a 3,7	50	8,7
	4 a 4,8	65	11,4
	4,8 a 5,6	100	17,5
	6 a 11	150	33

	6 a 8	125	60
	9 a 11	230	79
	5 a 11	300	30
	5 a 11	350	40
	8 a 14	450	60
	Hasta 4,8	20	10

### **Bandas modulares**

Se trata de bandas no continuas, es decir, formadas por módulos y cuya característica principal es la utilización de piñones de accionamiento.

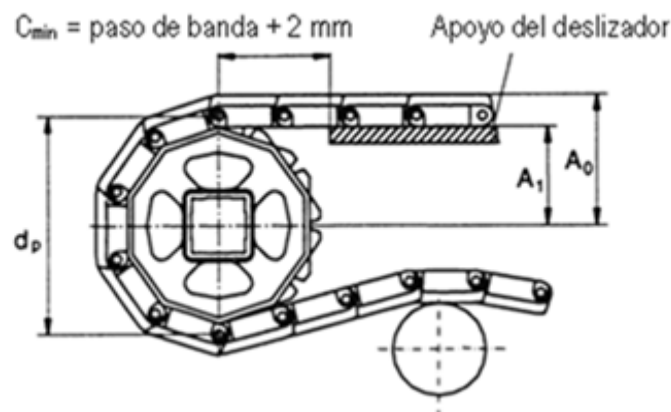
Debido a su reciente aparición, es creciente el número de aplicaciones donde pueden ser utilizadas. Su elección vendrá determinada por sus características principales y que son las que pueden verse a continuación:

- Buena tracción y alineación debido al arrastre por piñones.
- Bajo coste de mantenimiento y número de paradas por avería (no necesita mano de obra especializada).
- Todas las referencias son aptas para alimentación.
- Gracias a la superficie abierta permiten el drenaje en procesos húmedos.
- Posibilidad de transporte curvo.

También es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Determinar el número de piñones por eje en función de la tensión de trabajo.
- A mayor diámetro de tambor menor efecto poliédrico y mayor duración de los piñones.
- Fijación del piñón central del eje motriz para alinear la banda.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver un dibujo representativo con los elementos que componen las bandas modulares.



**Figura 11.** Dibujo esquemático de las bandas modulares.

La selección de la banda se hará en base al material, tipo de superficie y distancia entre varillas.

En la Tabla 5 se pueden ver los tres materiales más empleados y sus propiedades correspondientes.

**Tabla 5.** Materiales y propiedades de las bandas modulares.

MATERIAL	RANGO TEMP.	PROPIEDADES
<b>PP</b> (Polipropileno)	De +5° a 105 °C	Buena relación coste/prestaciones y resistencia química a ácidos y alcalinos.
<b>PE</b> (Poliéster)	De -70 °C a 60 °C	Material blando resistente a impactos y agentes químicos donde no hay abrasión.
<b>AC</b> (Acetal)	De -40 °C a 60 °C	Elevada resistencia y bajo coef. fricción. Para aplicaciones de transporte exigente.



### **Bandas de malla metálica**

Este tipo de bandas está especialmente indicado para el transporte de productos en diferentes aplicaciones industriales con temperaturas extremas, ya sean altas o bajas. También se emplean allí donde pueda haber un alto porcentaje de humedad con necesidades de drenaje, presencia de agentes contaminantes o corrosión química. Algunas aplicaciones son: hornos, secaderos, congelación, freidoras, etc.

En función de la temperatura a la que se quiera llegar, se empleará uno de los materiales que se detallan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Materiales de las bandas de malla metálica.

<b>MATERIAL</b>	<b>TEMP. MÁX. °C</b>
Acero extradulce	350
Acero galvanizado	<180
AISI 304	750
AISI 316	800
AISI 314	1150
Aleación 37-18	1150
Aleación 80-20	1150

Según el tipo de tracción que se emplee, se escogerá una banda dentro de las disponibles en cada uno de los grupos:

- Bandas de arrastre por tambor o rodillos.
- Bandas de arrastre por piñones.

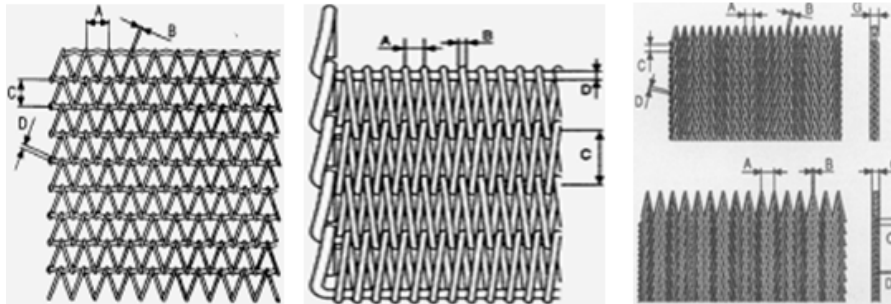
Una vez seleccionado el tipo, habrá que designar los diferentes parámetros que definen la banda. Estos son:

- Hilo de espiras (diámetro).
- Paso de espiras.
- Hilo de varillas (diámetro).
- Distancia entre varillas.

En las bandas con cadenas estos parámetros serán: paso, tipo de cadena, diámetro de varillas y número de pasos entre estas.

### Bandas metálicas con arrastre por rodillos

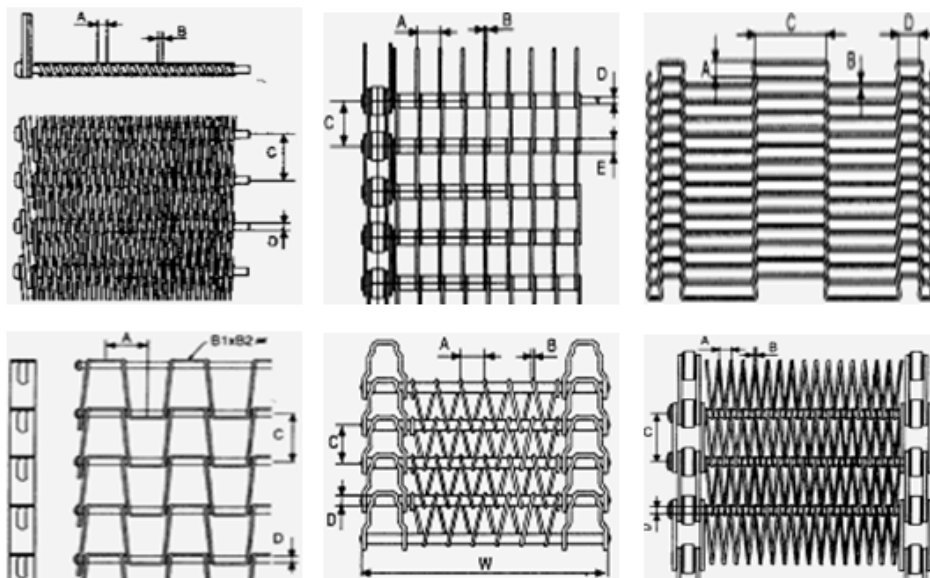
En las bandas metálicas con arrastre por rodillos se pueden encontrar los tres tipos de mallado que se representan en la Figura 12.



**Figura 12.** Tipos de mallado en bandas metálicas con arrastre por rodillos.

### Bandas metálicas con arrastre por piñones

En este caso, se puede elegir entre los seis tipos de mallado que la Figura 13 muestra.



**Figura 13.** Tipos de mallado en bandas metálicas con arrastre por rodillos.

### **Bandas de teflón**

Las bandas de teflón son bandas monotela, de fibra de vidrio o de Kevlar, en tejido continuo o en malla. Gracias a las propiedades del PTFE, estas bandas presentan las siguientes propiedades:

- Extraordinaria anti-adherencia.
- Elevada resistencia a la temperatura y a los agentes químicos.
- Atoxicidad y no envejecimiento.

Se emplean siempre en aplicaciones ligeras, debido principalmente a su espesor limitado. Las aplicaciones típicas son:

- Industria de la alimentación: horneado, congelado, pastelería,...
- Máquinas de envasado: túneles de retractilado, cintas selladoras.
- Artes gráficas y confección: termofijado, estampación, serigrafía,...

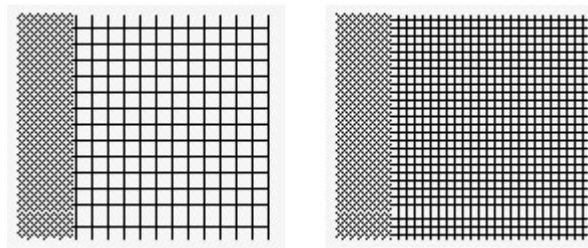
El recubrimiento, aparte de teflón, puede ser también de silicona, obteniendo las combinaciones que muestra la Tabla 7.

**Tabla 7.** Materiales y acabados de las bandas de teflón.

<b>Material</b>	<b>Acabado</b>	<b>Espesor (mm)</b>
Fibra de vidrio	PTFE liso	0,08-0,12-0,14-0,24
	PTFE liso	0,24
	Antiestático	0,45
	Silicona lisa	0,24
	Malla PTFE 1x1	0,60
	Malla PTFE 4x4	0,75
Kevlar	PTFE liso	0,18-0,30
	Malla PTFE 4x4	0,64

En las mallas, y opcionalmente en las bandas lisas, para evitar el deshilachado por rozamiento se colocan refuerzos laterales que consisten en tiras de material liso de un ancho aproximado de 20-25 mm y que se cosen a la malla.

Este refuerzo también se emplea en los extremos de las bandas, ya sean lisas o malladas, cuando se emplean cierres mecánicos (grapas). En la Figura 14 vienen representados estos refuerzos.



**Figura 14.** Refuerzos laterales en bandas de teflón.

Para mejorar el guiado y evitar posibles roturas por pliegues, se pueden colocar corchetes en uno de los lados. En la Figura 15 se puede ver una ilustración esquemática de estos corchetes.

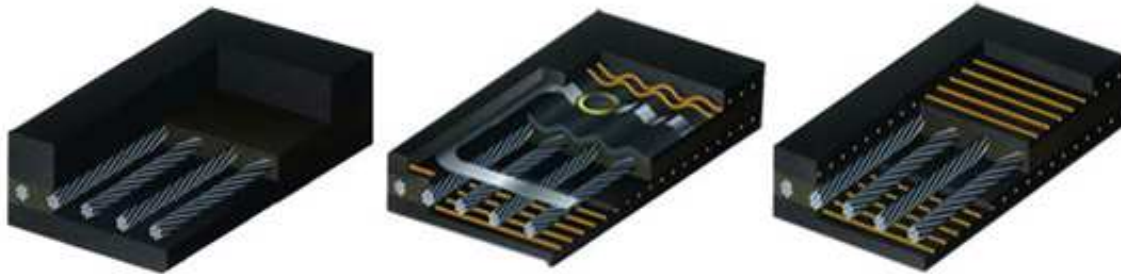


**Figura 15.** Corchetes en las bandas de teflón.

### **Bandas plásticas con refuerzo interior metálico**

Este tipo de bandas están formadas por plásticos y gomas más o menos duros dependiendo de las condiciones del transporte, material a transportar, distancia, etc. y por unos refuerzos internos formados por cables retorcidos de acero.

Son óptimas para el transporte de material pesado y dependiendo de las condiciones se utilizarán unas distribuciones de los cables u otras. En la Figura 16 se muestran algunos ejemplos.



**Figura 16.** Tipos de refuerzos interiores metálicos en bandas plásticas.

### **Bandas tipo tubo**

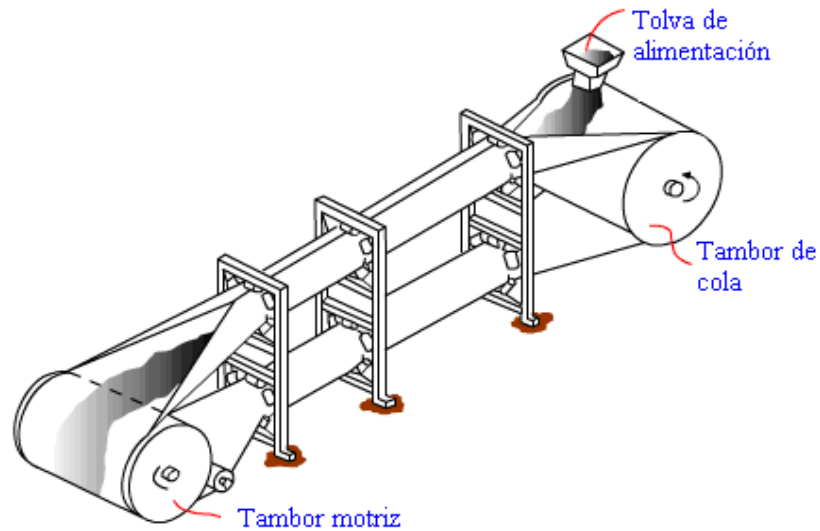
Cuando se requiere de un ambiente de trabajo impecablemente limpio, lo más conveniente es emplear un sistema de sellado para la banda transportadora.

La banda tipo tubo permite transportar materiales sin derramamiento, incluso en el retorno de la banda. También permite sistemas inclinados y con curvas que ayudan a disminuir espacio en el equipo. Por otra parte, simplifica el transportador y asegura un ambiente libre de contaminación.

Las principales características de las bandas tipo tubo son:

- Evita derramamientos de material y que el producto transportado sea contaminado con sustancias que puedan caer sobre él.
- Permite curvas inclinadas simplificando el sistema y disminuyendo espacio.
- Se logra un nivel más bajo de ruido y vibración.

En la Figura 17 se muestra un esquema general de las bandas tipo tubo.



**Figura 17.** Esquema general de la banda tipo tubo.

### 3.2.4. Aplicaciones

Las bandas transportadoras tienen varias características importantes que respaldan su aplicación en la industria y que se muestran a continuación:

- Son independientes de los trabajadores, es decir, se pueden colocar entre máquinas o edificios y el material colocado en un extremo llegará al otro sin necesidad de intervención humana.
- Proporcionan un método eficaz para el manejo de materiales mediante el cual los materiales no se extravían con facilidad.
- Se pueden utilizar para fijar el ritmo de trabajo siguiendo rutas fijas. Esto las hace adecuadas para la producción en masa o en procesos de flujo continuo.

Las principales aplicaciones de las bandas transportadoras se dan mayormente en la minería, construcción, industria alimenticia e industria motriz entre otros. A continuación se muestran algunos ejemplos [7].

## **Minería**

El sistema de transporte con banda es muy eficiente en la minería ya que posee las siguientes características:

- Opera en su propia cama de rodillos, los cuales requieren un mínimo de atención y mantenimiento.
- Los transportadores pueden seguir la naturaleza ordinaria del terreno debido a la habilidad que poseen para atravesar pasos relativamente inclinados (pendientes y gradientes de hasta 18°, dependiendo del material transportado). Con el desarrollo de tensiones elevadas, materiales sintéticos y/o miembros reforzados de acero, el sistema transportador puede extenderse a lo largo de kilómetros de terreno con curvas horizontales y verticales sin ningún problema.
- Tienen poco desgaste al trabajo agreste y duro de la minería.
- Las bandas transportadoras son importantes en la minería o en excavaciones, en donde dos o más operaciones de cavado pueden dirigirse a un mismo punto central de carga. En el final de la descarga, el material puede ser enviado en diversas direcciones desde la línea principal a la vez que puede ser descargado en cualquier punto a lo largo del transportador mediante la maquinaria complementaria para este efecto.

## **Construcción**

Las bandas presentan grandes garantías en este proceso ya que poseen las siguientes propiedades:

- Facilidad y rapidez en el montaje ya la banda puede ser armada y desarmada con gran facilidad.
- Gran capacidad para el transporte de material a grandes distancias.

- Rapidez en la conducción del material al lugar de trabajo con seguridad y eficiencia.

### **Industria alimentaria**

Es uno de los campos de aplicación donde este sistema es más utilizado debido a las siguientes características:

- Agiliza la producción ya que posee una velocidad constante y sin interrupción.
- Es higiénico, lo cual hace que el producto no se contamine con bacterias, suciedades u otros factores que podrían alterarlo.
- Puede ser instalado en interiores para obtener una mayor protección del producto.

### **Industria motriz**

En la industria motriz la banda transportadora resulta de gran utilidad ya que presenta las siguientes ventajas:

- Las líneas modulares de las cintas transportadoras pueden ser extendidas, acortadas o reubicadas con un mínimo de trabajo y tiempo.
- No tiene competencia en cuanto a capacidad de transporte. A una velocidad de 5 m/s puede descargar más de 100 toneladas métricas por minuto de materia prima.
- Su gran eficiencia reduce los costes de producción.



# **CAPITULO 4**

## **CÁLCULO DE LA BANDA TRANSPORTADORA**

### **4.1. PARÁMETROS REQUERIDOS**

A continuación se describen los parámetros técnicos que se requieren para efectuar los cálculos y operaciones necesarias en el diseño de la banda transportadora. Estos parámetros son los que el usuario del software deberá especificar al programa cuando este lo requiera, es decir, constituyen el input del programa, y básicamente son el material a transportar, la capacidad de transporte requerida, la trayectoria de la banda y el ancho de la cinta transportadora.

#### **4.1.1. Características del material a transportar**

El material que va a ser transportado es el parámetro más importante para el diseño y selección de componentes de una banda transportadora. Las características principales que se deben considerar para los cálculos son las siguientes.

### **Peso específico del material ( $\gamma$ )**

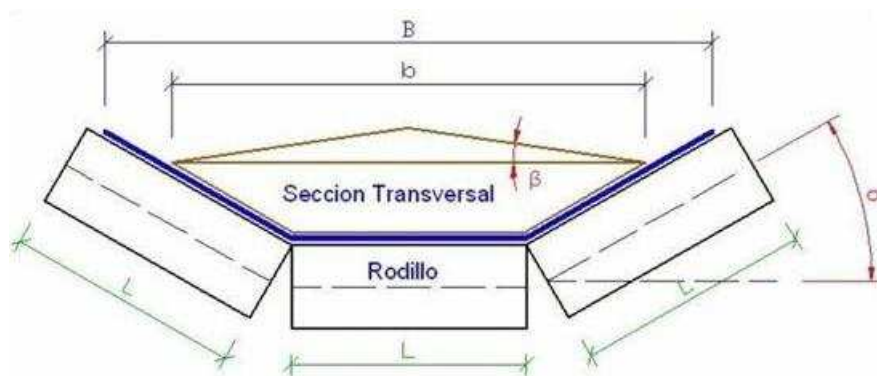
El peso específico de una sustancia se define como su peso por unidad de volumen y se expresa en  $\text{kg/m}^3$  (kilogramo por metro cúbico) en el Sistema Internacional. En muchos materiales el peso unitario está sujeto a variaciones debido al tamaño del material, a su grado de humedad y en el caso de los minerales a su formación natural. Sin embargo, y donde sea posible, el peso específico deberá ser correctamente determinado dependiendo del tamaño y tipo de material considerado [8].

### **Ángulo de reposo del material ( $\alpha$ )**

El ángulo de reposo del material es el ángulo que el material forma con respecto a la horizontal cuando éste se deja caer libremente. En estado dinámico, se habla del ángulo de talud del material en movimiento o ángulo de talud dinámico, el cual para la mayoría de los materiales es de  $10^\circ$  a  $15^\circ$  más bajo que el ángulo de talud estático, es decir, aquel que posee el material cuando no se encuentra en movimiento.

### **Ángulo de sobrecarga ( $\beta$ )**

El ángulo de sobrecarga (Figura 18) es el ángulo que forma la sección transversal del material sobre la banda transportadora con respecto a la horizontal. Para la mayoría de los materiales es conveniente emplear un ángulo de sobrecarga de  $15^\circ$ .



**Figura 18:** Ángulo de sobrecarga del material ( $\beta$ ).

**Ángulo de máxima inclinación ( $\phi$ )**

Es el ángulo bajo el cual el material puede ser transportado sobre la banda sin necesidad de bandas especiales, como por ejemplo cintas con nervios para evitar el deslizamiento del material. Este ángulo máximo de inclinación está determinado por la fricción entre el material y la banda, a diferencia del ángulo de talud que depende de la fricción interna del material. El ángulo máximo de inclinación es menor que el ángulo de talud dinámico. Los nervios contruidos en las bandas pueden ayudar a incrementar el ángulo de inclinación en caso de que la fricción entre la banda y el material sea menor que la fricción interna dinámica del material, lo cual determina el máximo ángulo de inclinación.

**Tamaño máximo de grano**

El tamaño máximo de grano del material es la dimensión de la partícula más grande del material que se transporta obtenido por pruebas de granulometría efectuadas en el laboratorio. Este valor es importante en la selección de:

- Ancho de banda.
- Tipo de rodillos para la zona de impacto de carga.
- Forma y dimensiones de la guía de carga.

También es importante conocer el porcentaje relativo del volumen correspondiente a granos finos y gruesos.

**Abrasividad**

Esta característica es importante en la selección del tipo de cinta transportadora y del espesor y número de capas de la cubierta de la misma. Los materiales pueden ser moderadamente abrasivos, designados con la letra C (carbón vegetal, granos, cal, virutas de madera), abrasivos, letra B (hielo triturado, carbón, cemento) o muy abrasivos, letra A (piedra, arena aguda, cobre mineral, grava, coque, dolomita). La Tabla 8 muestra algunos materiales generalmente empleados en la industria junto con

sus características anteriormente mencionadas. Estos son valores recomendados y los mismos pueden variar de acuerdo a las condiciones específicas de cada material en el momento del transporte.

**Tabla 8:** Características de algunos materiales.

Material	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Ángulo de reposo (°)	Ángulo máx. inclinación (°)	Abrasi- vidad	Material	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Ángulo de reposo (°)	Ángulo máx. inclinación (°)	Abrasiv idad
<a href="#">Arroz, gavillas</a>	90	24° a 26°	8°	C	<a href="#">Habichuelas</a>	775	24° a 26°	13°	C
<a href="#">Algodón, no apretado</a>	100	35° a 45°	19°	C	<a href="#">Arroz blanqueado</a>	800	24° a 26°	8°	C
<a href="#">Cacahuete con cáscara</a>	280	38°	18°	C	<a href="#">Guisantes</a>	800	24° a 26°	12°	C
<a href="#">Algodón, con su fibra</a>	420	25° a 27°	19°	C	<a href="#">Madera, virutas</a>	800	45°	27°	C
<a href="#">Café (granos secos)</a>	450	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Carbon</a>	850	27° a 35°	20°	B
<a href="#">Maíz, mazorcas peladas</a>	450	25° a 27°	10°	C	<a href="#">Cacao fresco</a>	900	26° a 30°	15°	C
<a href="#">Coque</a>	450	37° a 41°	18°	A	<a href="#">Caucho</a>	950	-	-	C
<a href="#">Avena</a>	520	27° a 29°	10°	C	<a href="#">Hielo triturado</a>	980	15°	-	B
<a href="#">Arroz cáscara</a>	550	24° a 26°	8°	C	<a href="#">Cemento</a>	1450	29°	19°	B
<a href="#">Harina refinada</a>	550	35° a 45°	20°	C	<a href="#">Arena</a>	1550	25° a 30°	24°	A
<a href="#">Cebada</a>	590	25° a 29°	14°	C	<a href="#">Grava</a>	1600	24° a 31°	16°	A
<a href="#">Lino</a>	600	24° a 26°	10°	C	<a href="#">Piedra</a>	1650	40°	20°	A
<a href="#">Cacahuete sin cáscara</a>	610	26° a 30°	30°	C	<a href="#">Mineral Hierro</a>	2100	35°	19°	B
<a href="#">Café (granos frescos)</a>	620	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Hormigón</a>	2450	-	-	B
<a href="#">Cacao (granos secos)</a>	635	26° a 30°	15°	C	<a href="#">Vidrio</a>	2500	-	-	B
<a href="#">Mijo</a>	700	24° a 26°	13°	C	<a href="#">Aluminio</a>	2700	-	-	B
<a href="#">Café comercial</a>	715	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Tierra</a>	5515	35°	20°	B
<a href="#">Arroz descascarado</a>	725	24° a 26°	8°	C	<a href="#">Estaño</a>	7310	-	-	B
<a href="#">Maíz, granos</a>	750	25° a 27°	10°	C	<a href="#">Acero</a>	7850	-	-	B
<a href="#">Soja, granos</a>	750	24° a 26°	14°	C	<a href="#">Cobre</a>	8960	-	-	B
<a href="#">Alfalfa, granos</a>	770	25° a 29°	14°	C	<a href="#">Plata</a>	10490	-	-	B
<a href="#">Trigo</a>	770	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Plomo</a>	11340	-	-	B
<a href="#">Cacao fermentado</a>	775	26° a 30°	13°	C	<a href="#">Oro</a>	19300	-	-	B
<a href="#">Frijoles</a>	775	24° a 26°	16°	C	<a href="#">Platino</a>	21450	-	-	B

### **Cohesión**

La cohesión es la cualidad por la cual las partículas se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen entre otras cosas del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con las que las rodean. Dependiendo de su mayor o menor grado de cohesión, se puede producir un mayor o menor desgaste de la banda y guías de carga.

### **Fluidez**

Es la propiedad inversa a la cohesión. De este modo, cuanto menor es la cohesión, mayor es la fluidez.

### **Temperatura (T)**

La temperatura del material transportado determina el tipo y la calidad de la cinta transportadora, así como también influye en la vida de los rodillos.

### **Corrosividad**

La corrosividad del material es otra característica que influye en el tipo y calidad de la cubierta de la banda transportadora ya que hace referencia al deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico de su entorno.

#### **4.1.2. Capacidad requerida y capacidad máxima**

La capacidad requerida es expresada en toneladas por hora y es el valor máximo de capacidad requerida por el proceso (no el valor promedio). Esta capacidad se empleará en los cálculos de las tensiones en la banda y la potencia requerida para accionar la cinta transportadora.

Por otra parte, también deberá calcularse la capacidad máxima de transporte. Esta capacidad dependerá del ancho de cinta que se seleccione, de la velocidad de la banda, del ángulo de inclinación de los rodillos transportadores y de la densidad del material transportado. La capacidad máxima calculada deberá ser mayor que la capacidad requerida para que la banda opere sin problemas.

### 4.1.3. Características geométricas de la banda transportadora

Para el cálculo y diseño de la banda transportadora es necesario definir la trayectoria de recorrido de la cinta desde el lugar de alimentación del material hasta el punto de descarga del mismo, el cual en la mayoría de los casos corresponde al cabezal motriz o de accionamiento. Para ello se deben definir los siguientes parámetros:

#### **Proyección horizontal de la longitud total de la banda (L)**

Es la distancia en metros medida a lo largo de la cinta entre centros de los tambores terminales en su proyección horizontal.

Se define como el sumatorio de todos los tramos horizontales más el sumatorio de la proyección horizontal de todos los tramos inclinados.

$$L = \sum L_h + \sum L_p$$

Donde:

$L_h$  : Longitud de los tramos horizontales (m).

$L_p$  : Longitud de la proyección horizontal de los tramos inclinados (m).

#### **Altura (H)**

Con altura se hace referencia a la diferencia de elevaciones entre los puntos de carga del material sobre la banda y el de descarga. Esta longitud es requerida para

calcular la tensión necesaria para bajar o levantar dicha carga. Para una banda transportadora con varios tramos de elevación se debe especificar la altura correspondiente a cada tramo a lo largo de la trayectoria de la banda, siendo este valor negativo en el caso de que el recorrido sea descendente.

### **Longitud de los tramos inclinados ( $L_i$ )**

La longitud de los tramos inclinados es la distancia en metros de todos los tramos inclinados de la banda medida a lo largo de la trayectoria de la banda y se calcula de la siguiente manera:

$$L_i = \sqrt{H^2 + L_p^2}$$

Donde:

$H$  : Altura (m).

$L_p$  : Longitud de la proyección horizontal de los tramos inclinados (m).

### **Ángulo de inclinación de la banda ( $\phi$ )**

El ángulo de inclinación de la banda viene determinado por el tipo de material a transportar y por el ángulo máximo de inclinación del material sin que se produzca deslizamiento del mismo sobre la banda. Se puede calcular de la siguiente manera:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{H}{L_p}\right)$$

Donde:

$H$  : Altura (m).

$L_p$  : Longitud de la proyección horizontal de los tramos inclinados (m).

### **Longitud total de la trayectoria de la banda (Lt)**

La longitud total de la trayectoria de la banda es la distancia total de la banda transportadora desde el punto de alimentación hasta el punto de descarga medida a lo largo de la trayectoria de la banda. Se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$L_t = \sum L_h + L_i$$

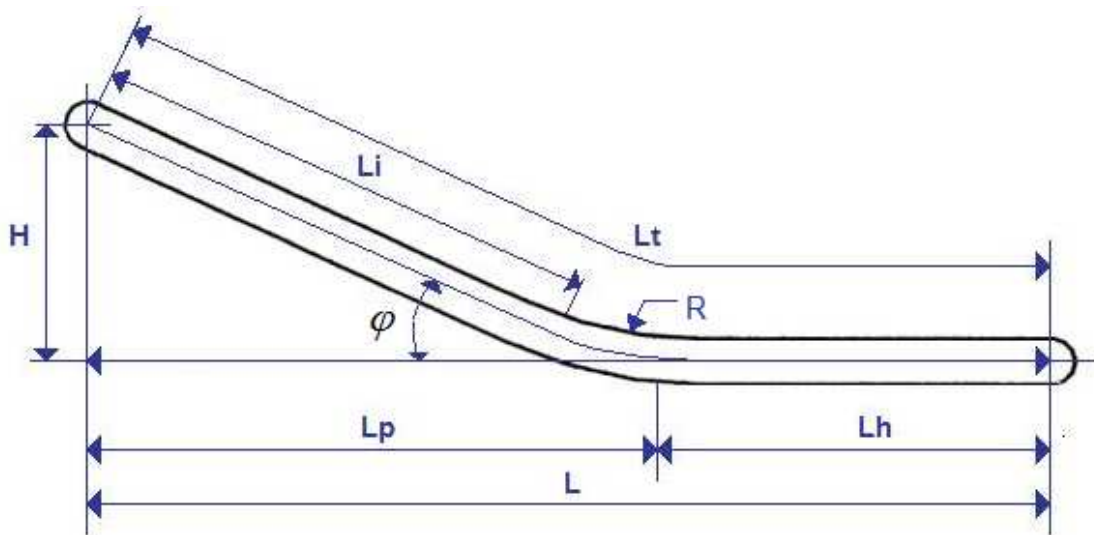
$L_h$  : Longitud de los tramos horizontales (m).

$L_i$  : Longitud de los tramos inclinados (m).

### **Radio de curvatura (R)**

El radio de curvatura es aquel formado entre el tramo horizontal y el tramo inclinado de la banda. Este radio de curvatura puede ser cóncavo o convexo.

A continuación se muestra un esquema con todos los conceptos geométricos anteriormente descritos (Figura 19).



**Figura 19:** Esquema geométrico de una banda transportadora.



$L$  : Longitud de la proyección horizontal de la longitud total de la banda ( $m$ ).

$L_h$  : Longitud del tramo horizontal ( $m$ ).

$L_p$  : Longitud de la proyección horizontal de los tramos inclinados ( $m$ ).

$H$ : Altura de elevación del material ( $m$ ).

$\varphi$  : Ángulo de inclinación de la banda ( $^\circ$ ).

$R$ : Radio de curvatura vertical ( $m$ ).

$L_i$  : Longitud del tramo inclinado (magnitud real) ( $m$ ).

$L_t$  : Longitud total de la trayectoria de la banda ( $m$ ).

#### 4.1.4. Ancho de banda

Conocidos el tonelaje horario a transportar y las características del material, el primer paso será determinar el ancho de la banda. En la selección del ancho de banda tiene una gran importancia el tamaño de material a transportar. Para un mismo tonelaje horario a transportar, un material de granulometría reducida requerirá una banda más estrecha que otro que esté constituido por granos de mayor tamaño. Como regla general, al ancho de banda no debe ser menor de tres veces la dimensión más grande del mayor grano de material a transportar.

En el caso de un material con granulometría elevada, la guía de carga debe ser lo suficientemente ancha para permitir el paso de cualquier combinación de granos gruesos y finos, lo cual restringe a un mínimo el ancho de la banda independientemente de la capacidad requerida. Como consecuencia, puede suceder que el ancho de banda requerido para manejar el tamaño de grano resulte más grande que el requerido por la capacidad de transporte. Esta condición puede ser evitada mediante trituración o molienda de los terrones grandes antes de ser alimentados a la banda transportadora.

Por lo tanto, para decidir un valor orientativo del ancho mínimo de banda se debe considerar el tipo de material y el tamaño de grano del mismo. La Tabla 9 indica los valores mínimos sugeridos de ancho de banda normalizados s/DIN 22101 en función del tamaño de grano máximo del material [9].

**Tabla 9:** Ancho de banda recomendado en función del tamaño de grano.

ANCHOS DE BANDA MINIMOS RECOMENDADOS		
Ancho de banda (mm)	Tamaños uniformes (mm)	Mezclado con 90% finos (mm)
400	50	100
500	75	150
650	125	200
800	175	300
1000	250	400
1200	350	500
1400	400	600
1600	450	650
1800	550	700
2000	600	750
2200	600	750

#### 4.1.5. Velocidad de la banda transportadora

La velocidad de la banda transportadora está condicionada por las características físicas del material. De esta forma, la velocidad se ve afectada por la degradación de materiales friables, pérdidas de material muy liviano o pulverizado, impacto de los terrones en los rodillos de carga, etc. Puede verse un ejemplo de estas limitaciones en el carbón, ya que al tratarse de un material friable no puede transportarse a gran velocidad debido a una posible disgregación como consecuencia de impactos, lo que haría que disminuyera su precio.

Otros factores que influyen en la selección de la velocidad son la capacidad requerida, la tensión resultante en la banda y la potencia requerida. Hasta donde la capacidad lo permita, es deseable seleccionar una velocidad de banda de forma que la cinta se encuentre lo más ocupada posible, produciendo de esta forma un mejor patrón de desgaste de la cubierta de la banda. Sin embargo, a veces es necesario llegar a un compromiso en favor de la tensión de la banda. Esto se logra incrementando la velocidad de la banda, lo cual reduce la sección transversal de la carga y en consecuencia se reduce la tensión, permitiendo una banda más liviana.

La velocidad tiene también un efecto sobre la potencia requerida, particularmente en bandas con poca o ninguna inclinación. Con un tonelaje horario constante, la potencia requerida disminuye a medida que la velocidad decrece. Esto se debe a que la potencia para hacer funcionar la banda varía con la velocidad.

El grado en que la velocidad afecta a la potencia requerida depende de la relación entre la carga útil y la carga total. Mientras más grande sea el porcentaje de carga útil, menor será el efecto que tendrá la velocidad en la potencia requerida. Tomando en consideración la densidad del material, el tamaño de terrón y ancho de banda, la Tabla 10 muestra los valores normalizados s/DIN 22101 de máxima velocidad de la banda y las velocidades recomendadas en función del tamaño de grano y el ancho de banda [9].

**Tabla 10:** Velocidad de banda recomendada en función del tamaño de grano.

VELOCIDADES DE BANDA NORMALIZADAS (m/s) s/DIN 22101									
0,66	0,84	1,05	1,31	1,68	2,09	2,62	3,35	4,19	5,24
VELOCIDAD DE BANDA MÁX. RECOMENDADA (m/s)									
Ancho de banda (mm)	Tamaño de grano (mm)								
	< 30	30-300	>300						
400	2.09	1.68	1.31						
500	3.35	2.09	1.68						
650	3.35	2.09	1.68						
800	3.35	2.62	2.09						
1000	4.19	2.62	2.09						
1200	4.19	2.62	2.09						
1400	4.19	3.35	2.09						
1600	4.19	3.35	2.62						
1800	4.19	3.35	2.62						
2000	5.24	3.35	2.62						
2200	5.24	3.35	2.62						

## 4.2. PARAMETROS CALCULADOS

Los parámetros calculados constituyen el output del programa, es decir, son la respuesta o resultado que el software arroja en función de los parámetros previamente ingresados por el usuario. Estos valores calculados servirán de base para el posterior diseño y selección de los componentes de la banda.

### 4.2.1. Capacidad máxima de transporte

La capacidad volumétrica de una banda transportadora está determinada por el área de la sección transversal de la carga que puede ser apilada encima de la cinta sin ocasionar derrame del material y pequeñas ondulaciones de la banda a su paso sobre los rodillos. Esta área de la sección transversal se ve afectada por las características del material comentadas anteriormente y es un factor determinante en el ángulo de sobrecarga.

En el cálculo de la capacidad real de la banda deben recordarse las siguientes recomendaciones:

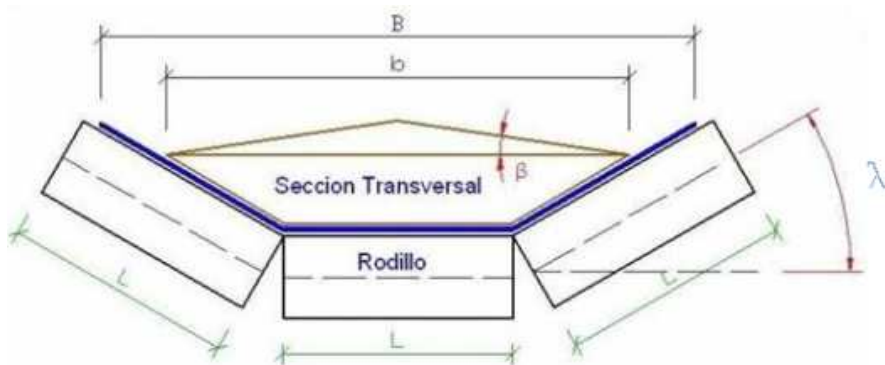
- Deben observarse las limitaciones en cuanto al ancho de la cinta debido al tamaño de grano máximo del material que se transporta y que están tabuladas en la Tabla 9.
- Deben observarse las limitaciones en cuanto a velocidad de la banda en función del tipo de material y del ancho de la cinta, estando estos valores tabulados en la Tabla 10.
- La forma y ubicación de la guía de carga y de la tolva en el punto de alimentación del material debe ser correctamente diseñada para permitir la mayor ventaja inicial en cuanto a la forma de reposo del material, de tal manera que éste ocupe el mayor espacio posible en el ancho de la banda.

- La banda debe ser alimentada de tal manera que el punto de carga se ubique en el centro del ancho de la banda y con una pendiente no mayor a  $8^\circ$  en dicho punto.
- El espaciamiento de los rodillos superiores debe ser apropiado de acuerdo a la tensión de la banda para minimizar la vibración de la misma. Esto evitará un posible derrame del material.
- Si se tienen tamaños de grano cerca del límite de ancho de la banda, es necesario colocar deflectores del material en la guía de carga para reubicar dicho material.
- La capacidad que se calcule con este método deberá contrastarse con la capacidad máxima requerida por el proceso (no con la capacidad promedio).

Teniendo en cuenta los comentarios anteriores, se van a detallar a continuación las operaciones necesarias para calcular los parámetros de la banda transportadora.

El área de la sección transversal de la carga sobre la banda en función de la forma de los rodillos portantes y viene determinada por las siguientes ecuaciones.

#### Rodillos en terna



**Figura 20.** Rodillos en terna.

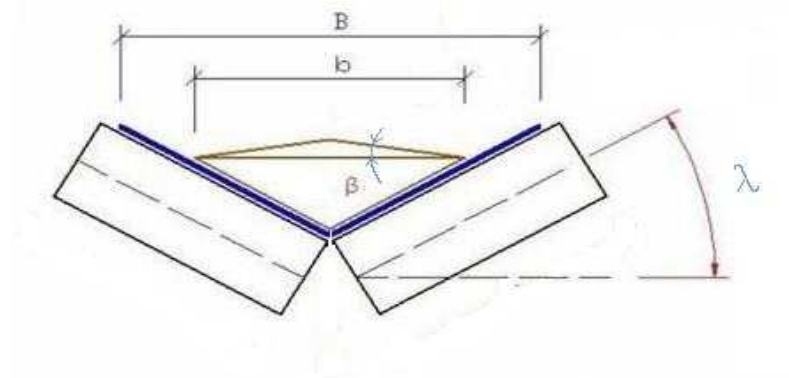
$$A = \frac{1}{4} b^2 (\tan \beta + 0.75 \tan \lambda)$$

Donde:

$$b = 0.9B - 0.05 \quad \text{si } B < 2 \text{ m.}$$

$$b = B - 0.2 \quad \text{si } B > 2 \text{ m.}$$

#### Rodillos en bina



**Figura 21.** Rodillos en bina.

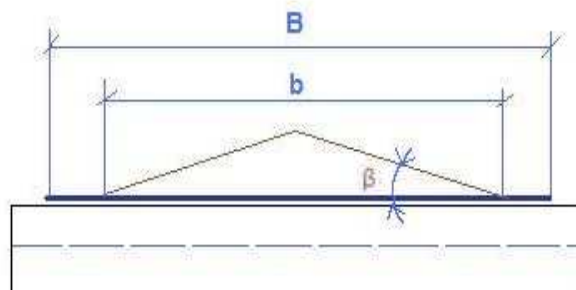
$$A = \frac{1}{4} b^2 (\tan \beta + 0.88 \tan \lambda)$$

Donde:

$$b = 0.9B - 0.05 \quad \text{si } B < 2 \text{ m.}$$

$$b = B - 0.2 \quad \text{si } B > 2 \text{ m.}$$

#### Rodillo plano



**Figura 22.** Rodillo plano.

$$A = \frac{1}{4}b^2(\tan \beta)$$

Donde:

$$b = 0.9B - 0.05 \quad \text{si } B < 2 \text{ m.}$$

$$b = B - 0.2 \quad \text{si } B > 2 \text{ m.}$$

De esta forma, la capacidad volumétrica de carga de la banda transportadora, conocida el área de la sección transversal del material y la velocidad de transporte de la banda, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$Q_v = 3600Av$$

Donde:

$Q_v$  : Capacidad volumétrica de la banda ( $m^3/h$ ).

$A$  : Área de la sección transversal del material ( $m^2$ ).

$v$  : Velocidad de la banda ( $m/s$ ).

Si la banda transportadora tiene inclinación, ya sea ascendente o descendente, el área efectiva de la sección transversal del material se reduce de acuerdo a un factor función del ángulo de pendiente de la banda. Este factor por inclinación de banda  $k$  puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$k = 1 - 1,64 \left( \frac{\varphi\pi}{180} \right)^2$$

Donde:

$k$  : factor de inclinación de la banda.

$\varphi$  : ángulo de inclinación de la banda ( $^\circ$ ).

Para una mayor comodidad, la Tabla 11 muestra los valores del factor  $k$  para unas pendientes de inclinación determinadas [9].

**Tabla 11.** Factor ( $k$ ) debido a la inclinación de la banda.

Inclinación (°)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
K	1	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,85	0,81

Por lo tanto, la capacidad volumétrica efectiva para bandas con inclinación ascendente o descendente viene dada por la ecuación:

$$Q_v = 3600Avk$$

Donde:

$Q_v$ : Capacidad volumétrica de la banda ( $m^3 / h$ ).

$A$  : Área de la sección transversal del material ( $m^2$ ).

$v$  : Velocidad de la banda ( $m / s$ ).

$k$  : Factor de inclinación de la banda.

La capacidad de transporte en toneladas por hora, se obtiene multiplicando la capacidad volumétrica por el peso específico del material transportado:

$$Q_t = \gamma Q_v$$

Donde:

$Q_t$ : Capacidad de la banda ( $t / h$ ).

$Q_v$ : Capacidad de la banda ( $m^3 / h$ ).

$\gamma$  : Peso específico del material transportado ( $t / m^3$ ).



### 4.2.2. Fuerzas en la banda

Para poder realizar su función, la banda transportadora requiere una potencia que es suministrada por el motor que acciona el tambor conductor o motriz. El momento del motor se transmite en forma de fuerza tangencial sobre la superficie del tambor motriz creando el empuje o fuerza requerida para mover el material desde el punto de carga hasta el de descarga. Esta fuerza es la resultante del sumatorio de las siguientes fuerzas:

- a) Fuerza necesaria para mover la banda sin carga, vacía.
- b) Fuerza necesaria para desplazar la carga horizontalmente.
- c) Fuerza necesaria para elevar o descender la carga.

La contribución relativa de cada una de estas componentes en la fuerza total varía ampliamente dependiendo de la inclinación de la cinta y de la carga transportada.

Estas son las fuerzas producidas únicamente para desplazar el material desde el punto de alimentación hasta el de descarga. Para calcular las tensiones en la banda y la potencia requerida, se deben considerar las pérdidas mecánicas por fricción del sistema completo de accionamiento, las cuales son debidas a las guías de carga, rascadores y cualquier tipo de desalineamiento de los tambores o rodillos. Estas pérdidas serán explicadas en detalle más adelante.

#### **Factores por fricción y por longitud**

Las fuerzas mencionadas anteriormente se deben básicamente a la fricción generada por el peso de la banda, peso de las partes móviles de los rodillos y tambores, arrastres debidos a las guías de carga, rascadores y desalineamientos.

Adicionalmente, el peso del material sobre la banda y la fricción interna que el material genera a medida que pasa una y otra vez sobre los rodillos incrementan la fricción en el sistema. El cálculo de estas fuerzas de fricción depende de un factor llamado coeficiente de fricción de las partes móviles  $f$ , el cual varía en función del tipo de rodillos empleados, la estructura de la banda y el mantenimiento del sistema. El valor

estándar de este coeficiente es de 0.020, pero puede incrementarse según las siguientes condiciones:

- Debido a una alta fricción interna del material.
- Debido a la utilización de rodillos portantes menores a 108 mm de longitud.
- Cuando la velocidad de la banda es mayor a 5 m/s.
- Cuando la temperatura de operación es menor a 20°C.
- Cuando las tensiones en la banda son bajas.
- En bandas flexibles y con grandes espesores de cubierta.

La Tabla 12 muestra los valores recomendados de coeficiente de fricción de las partes móviles en función de las condiciones de operación, mantenimiento y estanqueidad.

**Tabla 12.** Coeficiente de fricción ( $f$ ) de las partes giratorias.

Condiciones de operación	Coeficiente $f$
Bandas transportadoras descendentes que requieren frenado mediante motor.	0.012
Buenas bandas transportadoras con rodillos de marcha suave y pequeña fricción en el material.	0.017
Condiciones con ambiente normal de trabajo.	0.020
Condiciones de marcha desfavorables, ambiente polvoriento, sobrecargas periódicas y/o puntuales.	0.023-0.030

Por otro lado, muchas de las componentes de las fuerzas de fricción tales como las creadas en los cojinetes de los tambores, fricción de los rascadores, inercia de los tambores, etc., se agrupan en lo que se denominan resistencias secundarias. Debido a esto y según la norma DIN 22101, se debe emplear un coeficiente  $C$  variable con la longitud de la cinta (proyección horizontal si la banda es inclinada). Para cintas de poca longitud, dicho coeficiente es grande debido a la gran proporción que representan las resistencias secundarias sobre el total, y por el contrario, tiende a la unidad para cintas largas (por encima de los 2000 m). La ecuación que relaciona el coeficiente  $C$  con la longitud de la cinta es la siguiente.

$$C = 15.9L^{-0.61} + 0.77$$

Donde:

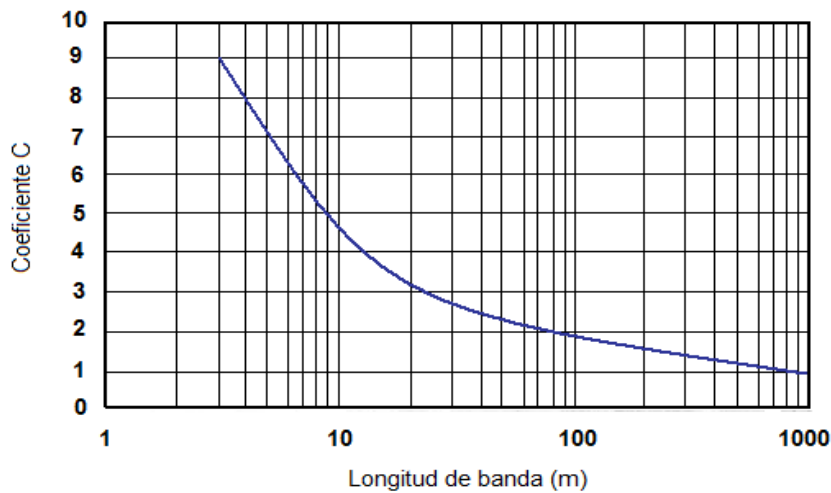
$$L = \sum L_h + \sum L_p$$

$L$  : Longitud de la proyección horizontal de la longitud total de la banda (m).

$L_h$  : Longitud de todos los tramos horizontales (m).

$L_p$  : Longitud de la proyección horizontal de todos los tramos inclinados (m).

Esta ecuación se determina a partir de la gráfica de la variación del coeficiente  $C$  en función de la longitud de la banda s/DIN 22101 (Figura 23).



**Figura 23.** Coeficiente de fricción  $C$  en función de la longitud de la banda.

### Cálculo del peso de las partes móviles de la banda

Se denominará  $G$  al peso de las partes móviles del sistema completo de la banda transportadora. De esta forma, el peso  $G$  incluye el peso de la cinta y el peso de los rodillos transportadores y de retorno. Se expresa en kilogramos por metro de longitud entre centros de tambores de la banda y se calcula de la siguiente forma.

$$G = 2G_b + \frac{G_{ro}}{S_1} + \frac{G_{ru}}{S_2}$$

Donde:

$G$  : Peso de las partes móviles ( $kg/m$ ).

$G_b$  : Peso de la banda ( $kg/m$ ).

$G_{ro}$  : Peso de los rodillos superiores ( $kg$ ).

$S_1$  : Espaciamiento entre rodillos superiores ( $m$ ).

$G_{ru}$  : Peso de los rodillos inferiores ( $kg$ ).

$S_2$  : Espaciamiento entre rodillos inferiores ( $m$ ).

Existen tablas proporcionadas por los fabricantes que muestran los valores promedios de  $G$  en función del ancho de banda y del peso específico del material a ser transportado. Para un diseño preliminar, se pueden utilizar estos valores para el cálculo posterior de las tensiones en la banda, sin embargo, se recomienda calcular el valor exacto en función de la banda y del tipo de rodillos superiores y de retorno.

A continuación se explica de forma detallada como obtener cada uno de los valores que han aparecido anteriormente en la ecuación de cálculo del peso de las partes móviles de la banda.

La Tabla 13 muestra los valores recomendados de espaciamiento entre rodillos superiores e inferiores en función del ancho de banda y el peso específico del material a transportar.

**Tabla 13.** Espaciamiento entre rodillos recomendado.

Ancho de banda (mm)	Espaciamiento rodillos superiores S1 (m)										Espaciamiento rodillos inferiores S2 (m)
	Peso específico del material (kg/m³)										
	500	800	1000	1400	1600	2400	3200	4000	5000	>6000	
400	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.2	0.9	0.75	3.0
500	1.5	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.60	3.0
650	1.5	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	0.9	0.9	0.5	3.0
800	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.5	3.0
1000	1.4	1.4	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.75	0.5	3.0
1200	1.4	1.4	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.75	0.5	3.0
1400	1.4	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.75	0.75	0.5	3.0
1600	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.75	0.60	0.5	3.0
1800	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9	0.75	0.75	0.60	0.5	0.5	2.4
2000	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9	0.75	0.75	0.60	0.5	0.5	2.4
2200	1.0	1.0	1.0	0.9	0.75	0.75	0.60	0.5	0.5	0.5	2.4

La Tabla 14 muestra los valores promedio del peso de la cinta en función del ancho de banda y del tipo de servicio o transporte.

**Tabla 14.** Peso de la banda recomendado.

Ancho de banda (mm)	Servicio liviano Peso específico < 1500 kg/m <sup>3</sup>	Servicio mediano 800 < Peso específico < 1500 kg/m <sup>3</sup>	Servicio pesado Peso específico > 1500 kg/m <sup>3</sup>
	Peso de la banda transportadora $G_b$ (kg/m)		
400	3.0	4.5	6.0
500	6.0	7.5	9.0
650	7.5	9.0	10.5
800	9.0	10.5	12.0
1000	10.5	13.5	16.5
1200	13.5	16.5	21.0
1400	18.0	22.5	27.0
1600	21.0	27.0	33.0
1800	25.5	31.5	40.5
2000	30.0	36.0	48.0
2200	33.0	42.0	54.0

Finalmente, la Tabla 15 muestra los valores promedios recomendados de los pesos de los rodillos superiores y de retorno en función del ancho de banda y del peso específico del material.

**Tabla 15.** Peso de rodillos recomendado.

Ancho de banda (mm)	Servicio liviano Peso específico < 1500 kg/m <sup>3</sup>		Servicio pesado Peso específico > 1500 kg/m <sup>3</sup>	
	$G_{sup}$ (kg)	$G_{inf}$ (kg)	$G_{sup}$ (kg)	$G_{inf}$ (kg)
400	3.0	3.0	4.0	4.0
500	3.5	3.5	5.5	5.5
650	5.5	5.5	10	10
800	11	10	14	12
1000	13	11	18	16
1200	15	13	20	18
1400	22	20	31	27
1600	25	22	35	30
1800	39	35	47	40
2000	43	36	52	45
2200	47	40	56	47

### **Cálculo de la carga en los rodillos superiores**

La carga que actúa sobre los rodillos superiores se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$C_{ro} = [(G_b + K_1 M_{pm}) S_1] + C_{dr}$$

Donde:

$C_{ro}$  : Carga sobre los rodillos superiores (kg).

$G_b$  : Peso de la banda (kg/m).

$K_1$  : Factor de ajuste por tamaño de grano del material, ver Tabla 16.

$M_{pm}$  : Carga del material por metro de banda (kg/m).

$S_1$  : Espaciamiento entre rodillos superiores (m), ver Tabla 13.

$C_{dr}$  : Carga por desalineamiento de los rodillos (kg).

El valor de carga del material por metro de banda  $M_{pm}$  se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$M_{pm} = \frac{Q_t}{3,6v}$$

Donde:

$M_{pm}$  : Carga del material por metro de banda (kg/m).

$Q_t$  : Capacidad mínima de la banda (ton/h).

$v$  : Velocidad de la banda (m/s).

La Tabla 16 muestra los valores experimentales calculados para el factor de ajuste  $KI$  debido al tamaño de grano del material transportado [10].

**Tabla 16.** Factor de ajuste K1 debido al tamaño de grano del material.

Tamaño de grano (mm)	Peso específico del material (kg/m <sup>3</sup> )						
	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
100	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1
150	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
200	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
250	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
300	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3
350	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3
400	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4
450	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4

El valor de carga por desalineamiento de los rodillos se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C_{dr} = \frac{miT_1}{9,8(6S_1)}$$

Donde:

$C_{dr}$  : Carga por desalinamiento de los rodillos ( $kg$ ).

$mi$  : Desalineamiento de los rodillos ( $m$ ).

$T_1$  : Tensión en el lado tenso ( $N$ ).

$S_1$  : Espaciamiento de los rodillos superiores ( $m$ ).

### **Cálculo de la carga en los rodillos inferiores**

La carga que actúa sobre los rodillos inferiores se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$C_{ru} = G_b S_2 + C_{dr}$$

Donde:

$C_{ru}$  : Carga sobre los rodillos inferiores ( $kg$ ).

$G_b$  : Peso de la banda ( $kg/m$ ).

$S_2$  : Espaciamiento entre rodillos inferiores ( $m$ ), ver Tabla 13.

$C_{dr}$  : Carga por desalineamiento de los rodillos ( $kg$ ).

Como sucedía con los rodillos superiores, en este caso también se puede calcular el valor de carga por desalineamiento de los rodillos inferiores utilizando la siguiente ecuación:

$$C_{dr} = \frac{miT_2}{9,8(6S_2)}$$

Donde:

$C_{dr}$  : Carga por desalinamiento de los rodillos ( $kg$ ).

$mi$  : Desalineamiento de los rodillos ( $m$ ).

$T_2$  : Tensión en el lado flojo ( $N$ ).

$S_2$  : Espaciamiento entre rodillos inferiores ( $m$ ).

### **Fuerza para mover la banda en vacío y sus componentes móviles**

La fuerza necesaria para mover la banda y los elementos móviles cuando ésta se encuentra en vacío, sin material, puede ser calculada de la siguiente manera:

$$F_1 = (CfLG)g$$

Donde:

$F_1$  : Fuerza para mover la banda en vacío ( $N$ ).

$C$  : Factor de fricción por longitud de banda.

$f$  : Factor de fricción de las partes móviles.

$L$  : Longitud total de la banda (proyección horizontal) ( $m$ ).

$G$  : Peso de las partes móviles ( $kg/m$ ).

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).



### **Fuerza para desplazar el material horizontalmente**

Esta es la fuerza necesaria para vencer la inercia del material y desplazarlo en dirección horizontal desde el punto de alimentación hasta el de descarga. Se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$F_2 = \left( \frac{CfLQ_t}{3,6v} \right) g$$

Donde:

$F_2$  : Fuerza para desplazar el material horizontalmente (N).

$C$  : Factor de fricción por longitud de banda.

$f$  : Factor de fricción de las partes móviles.

$L$  : Longitud total de la banda (proyección horizontal) (m).

$Q_t$  : Capacidad máxima de transporte (t/h).

$v$  : Velocidad de la banda (m/s).

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

### **Fuerza para elevar o descender el material**

Este tipo de fuerza es la requerida para poder realizar la elevación o descenso de la carga y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$F_3 = \left( \frac{HQ_t}{3,6v} \right) g$$

Donde:

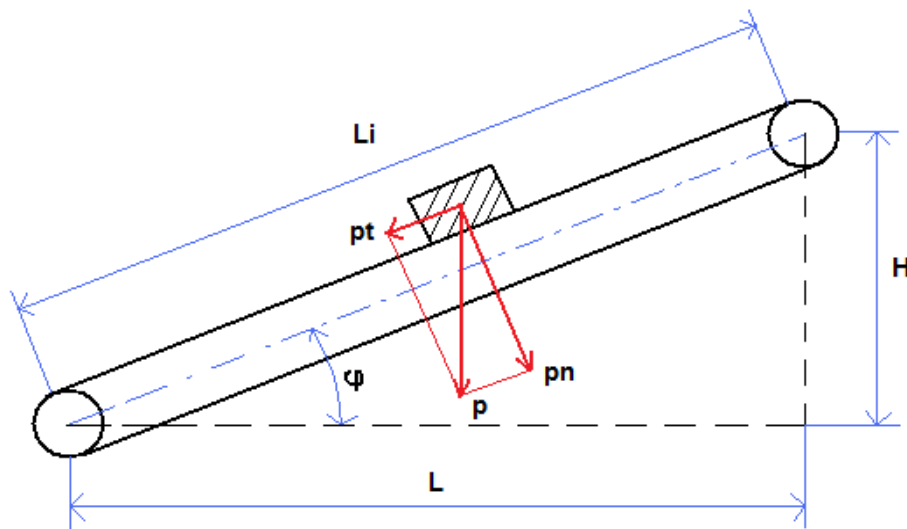
$F_3$  : Fuerza para desplazar verticalmente el material (N).

$H$  : Distancia de elevación neta de la carga (m).

$Q_t$  : Capacidad máxima de transporte (t/h).

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

A continuación se va a explicar la demostración de las tres ecuaciones enunciadas anteriormente. Para ello, se utilizará el diagrama de fuerzas de un plano inclinado que aparece en la Figura 24.



**Figura 24.** Esquema de un plano inclinado con carga.

La componente de la carga tangencial a la banda es:

$$p_t = p \sin \varphi$$

La componente de la carga normal a la banda es:

$$p_n = p \cos \varphi$$

La componente  $p_t$  representa la fuerza necesaria para elevar la carga, por lo tanto en este caso  $p$  es el peso total del material sobre la longitud inclinada  $L_i$ .

$$p_t = (\text{peso material}) \sin \varphi$$

$$p_t = (\text{peso material}) (H / L_i)$$

El cociente (*peso material*)/ $L_i$  se puede determinar en función de la capacidad máxima de transporte, dato que normalmente es conocido. De este modo:

$Q_t$  : Capacidad máxima de transporte ( $t/h$ ).

$1000Q_t$ : Capacidad máxima de transporte ( $kg/h$ ).

$v$  : Velocidad de la banda ( $m/s$ ).

$3600 v$ : Velocidad de la banda ( $m/h$ ).

Por lo tanto:

$$\frac{1000Q_t}{3600v} = \frac{Q_t}{3,6v}$$

Considerando kilogramos de material por metro de banda, se obtiene:

$$p_t = \frac{HQ_t}{3,6v}$$

Esta es la fuerza para elevar o descender la carga que se ha denominado  $F_3$ , expresada en kilogramos:

$$F_3 = \left( \frac{HQ_t}{3,6v} \right)$$

La componente  $p_n$  (normal a la banda) representa la fuerza necesaria para vencer la fricción de la banda en vacío, de los componentes que giran y del material en su desplazamiento horizontal, por lo tanto en este caso  $p$  se compone del peso del material más el peso de las partes móviles (banda y rodillos).

$$p = \left( \frac{Q_t}{3,6v} \right) L_i + GL_i$$

En la Figura 24 puede verse que:

$$\cos \varphi = \frac{L}{L_i}$$

Por lo tanto, la componente normal  $p_n$  viene dada por:

$$p_n = \left( \frac{Q_t}{3,6v} \right) L + GL = L \left( \frac{Q_t}{3,6v} + G \right)$$

Aplicando la ley de rozamiento para determinar la fuerza necesaria para vencer estas fricciones se tiene:

$$fuerza = \mu p_n$$

Esta fuerza es la suma de las fuerzas de fricción para desplazar la carga horizontalmente y para mover la banda en vacío con sus componentes giratorios, por lo tanto:

$$F_1 + F_2 = \mu p_n$$

$$F_1 + F_2 = \mu L \left( \frac{Q_t}{3,6v} + G \right)$$

El coeficiente de fricción  $\mu$  es el que se definió en párrafos anteriores como  $f$ , ya que es con esta designación con la que la mayoría de los fabricantes identifican a este factor de fricción. Por lo tanto:

$$F_1 + F_2 = fL \left( \frac{Q_t}{3,6v} + G \right)$$

$$F_1 + F_2 = \frac{fLQ_t}{3,6v} + fLG$$

Esta última expresión es puramente teórica y no tiene en cuenta las pérdidas por fricción originadas en los tambores. Por otra parte, pueden valorarse aisladamente

dichas pérdidas haciendo la conversión adecuada según los métodos de cálculo empleados por las normas DIN, que como ya se explicó, consisten en multiplicar esta última expresión por un coeficiente  $C$  variable con la longitud de la cinta, obteniendo de esta forma:

$$F_1 + F_2 = \frac{CfLQ_t}{3,6v} + CfLG$$

### 4.2.3. Potencias en la banda

La potencia requerida para accionar la banda transportadora está compuesta por la potencia necesaria para desplazar el material más las potencias adicionales debidas a la fricción de las guías de carga y carros descargadores o trippers. Las ecuaciones que a continuación se describen, sirven para determinar el valor de estas potencias adicionales. Son cálculos empíricos que los fabricantes de bandas transportadoras proporcionan en sus catálogos como un medio para estimar estas pérdidas mecánicas y han sido obtenidas a partir de pruebas y ensayos experimentales.

#### Potencia adicional debida a las guías de carga

En instalaciones grandes, la longitud de las guías de carga genera resistencias adicionales que deben ser consideradas. Esta resistencia adicional puede determinarse mediante la siguiente ecuación.

$$P_s = 0.08vl$$

Donde:

$P_s$  : Potencia adicional debida a las guías de carga ( $kW$ ).

$v$  : Velocidad de la banda ( $m/s$ ).

$l$  : Longitud total de guías de carga ( $m$ ).

### **Potencia adicional debida a carros descargadores o trippers**

Las bandas transportadoras ordinarias generalmente descargan en el tambor de cabeza, sin embargo, puede ser necesario descargar el material en algún punto intermedio anterior. Es en este tipo de situaciones en las que se suelen utilizar los carros descargadores o trippers.

Los carros descargadores pueden ser fijos o móviles. Ambos tipos pueden colocarse para descargar a cada lado de la cinta o directamente debajo de la banda. Básicamente, el procedimiento consiste en elevar la carga desde el nivel normal de la cinta y traspasarla a un tambor de descarga.

La potencia adicional requerida en las bandas transportadoras con trippers se compone de la potencia necesaria para elevar la carga y de la potencia que surge como consecuencia de la fricción del carro en sí mismo. Dependiendo del ancho de banda y de la velocidad de transporte, la potencia adicional puede ser calculada mediante los valores que aparecen en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Potencia adicional requerida debida a carros descargadores (trippers).

Ancho de banda (mm)	Potencia adicional requerida (KW)
$\leq 500$	0,8velocidad de la banda (m/s)
de 500 a 1000	1,5velocidad de la banda (m/s)
$> 1000$	2,2velocidad de la banda (m/s)

### **Potencia teórica**

La potencia teórica es la suma de la potencia necesaria para desplazar el material, más las potencias adicionales debidas a las guías de carga y a los carros descargadores. Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$P = \frac{(F_1 + F_2 + F_3)v}{1000} + P_s + P_a$$

Donde:

$P$  : Potencia teórica ( $kW$ ).

$F_1$  : Fuerza para mover la banda en vacío ( $N$ ).

$F_2$  : Fuerza para mover la carga horizontalmente ( $N$ ).

$F_3$  : Fuerza para elevar o descender la carga ( $N$ ).

$v$  : Velocidad de la banda ( $m/s$ ).

$P_s$  : Potencia adicional debida a guías de carga ( $kW$ ).

$P_a$  : Potencia adicional debida a trippers ( $kW$ ).

Esta es la potencia que se debe aplicar al tambor motriz para que se genere una fuerza tangencial en el mismo, llamada tensión efectiva, la cual será capaz de mover la banda y desplazar el material desde el punto de alimentación hasta el de descarga.

### **Potencia del motor**

Para el cálculo de la potencia del motor solo se ha considerado la potencia requerida en el tambor motriz. Las pérdidas por fricción de los demás tambores han sido incluidas en el factor de fricción variable con la longitud  $C$ .

Los métodos para conectar el motor con el tambor motriz son numerosos. La alta velocidad de giro producida por el motor, puede reducirse mediante la utilización de bandas, poleas, cadenas, engranajes, cajas reductoras, o alguna combinación de estas. Estas transmisiones generan pérdidas mecánicas que deben ser consideradas para determinar la potencia real del motor.

La eficiencia del motor se puede estimar en un rango entre 85% y 95% mientras que las eficiencias mecánicas de equipos reductores de velocidad pueden verse en la Tabla 18 [11].

**Tabla 18.** Eficiencia mecánica de equipos reductores de velocidad.

Tipo de mecanismo reductor	Eficiencia
Poleas y bandas en V	94%
Cadena de rodillos	93%
Cadena de rodillos lubricados en aceite	95%
Reductor de engranajes helicoidales, una reducción	95%
Reductor de engranajes helicoidales, doble reducción	94%
Reductor de engranajes helicoidales, triple reducción	93%
Reductor de tronillo sin fin (relación 20:1)	90%
Reductor de tronillo sin fin (relación 20:1 a 60:1)	70%
Reductor de tronillo sin fin (relación 60:1 a 100:1)	50%
Reductor de engranajes rectos (mecanizados)	90%
Reductor de engranajes rectos (fundidos)	85%

Teniendo en cuenta las eficiencias anteriormente comentadas, la potencia del motor se determina de la siguiente forma.

$$P_m = \frac{P}{\eta \varepsilon}$$

Donde:

$P_m$  : Potencia del motor (*kW*).

$P$  : Potencia teórica requerida (*kW*).

$\eta$  : Eficiencia del motor (*% / 100*).

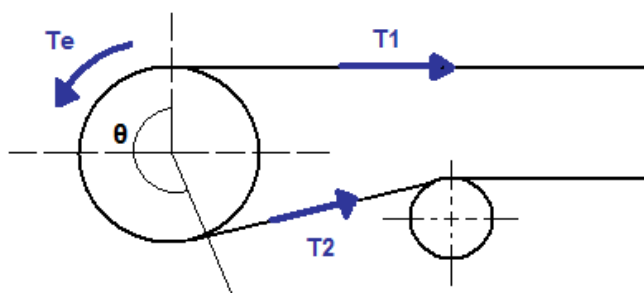
$\varepsilon$  : Eficiencia mecánica de la transmisión (*% / 100*).



#### 4.2.4. Tensiones en la banda

##### Tensión Efectiva

En cualquier accionamiento por banda, sea para transporte o elevación, debe existir una diferencia de tensiones a ambos lados del tambor conductor para que se produzca el movimiento (Figura 25).



**Figura 25.** Tensión efectiva.

La tensión mayor es llamada tensión del lado tenso  $T_1$ , y la tensión más pequeña es llamada tensión del lado flojo  $T_2$ , de forma que sin la tensión del lado flojo para prevenir el deslizamiento, la banda no puede transmitir el movimiento.

La diferencia entre la tensión del lado tenso y la tensión del lado flojo se conoce como tensión efectiva  $T_e$ , debido a que es esta tensión la que realmente ejecuta el trabajo. Como se comentó anteriormente, esta tensión se obtiene considerando las fuerzas necesarias para elevar o descender la carga, desplazar el material horizontalmente, mover la banda y los componentes móviles en vacío así como las pérdidas debidas a guías de carga, rascadores, trippers, etc.

Conocida la potencia total que se debe aplicar al tambor motriz, la tensión efectiva puede ser determinada mediante la siguiente ecuación.

$$T_e = \frac{1000P}{veB}$$

Donde:

$T_e$  : Tensión efectiva ( $N/m$ ).

$P$  : Potencia teórica ( $KW$ ).

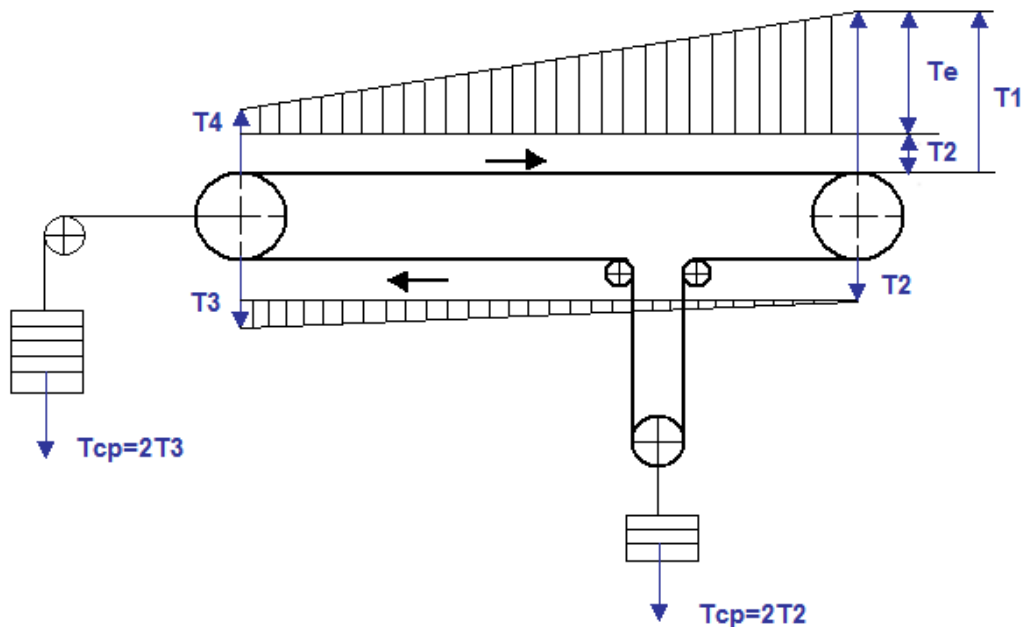
$v$  : Velocidad de la banda ( $m/s$ ).

$e$  : Espesor de la banda ( $m$ ).

$B$  : Ancho de banda ( $m$ ).

### **Tensión en el lado tenso T1**

En la Figura 26 puede verse un diagrama esquemático que muestra las principales tensiones que aparecen en una banda transportadora.



**Figura 26.** Diagrama de tensiones principales en la banda transportadora.

La tensión creada en el lado tenso  $T_1$  se determina multiplicando la tensión efectiva por un factor llamado coeficiente de accionamiento  $m$ .

$$T_1 = T_e m$$

Donde

$T_1$  : Tensión en el lado apretado (N/m).

$T_e$  : Tensión efectiva (N/m).

$m$  : Coeficiente de accionamiento.

Los valores de  $m$  dependen del arco de contacto entre la banda y el tambor motriz, el tipo de contrapeso y de si el tambor es revestido o desnudo. De esta forma, los valores de  $m$  se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$m = \frac{1}{e^{\mu\theta} - 1}$$

Donde:

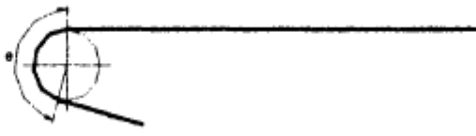
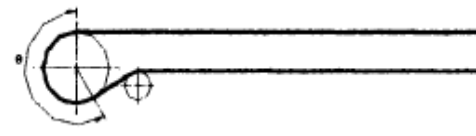
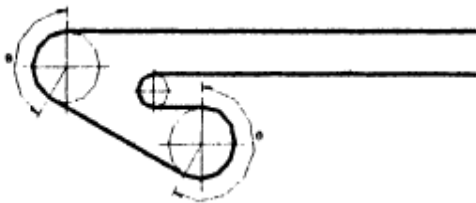
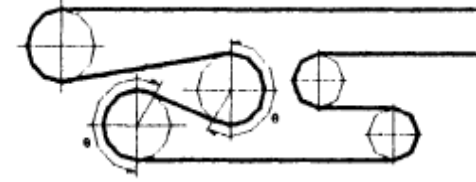
$\mu$ : Coeficiente de fricción entre la banda y el tambor.

$\theta$ : Ángulo de contacto entre la banda y el tambor ( $^\circ$ ).

La Tabla 19 muestra los valores del coeficiente de fricción  $\mu$  entre el tambor y la banda, y los valores del ángulo de contacto dependiendo de la disposición del tambor motriz y el de los posibles tambores adicionales intermedios [12].

**Tabla 19.** Ángulos de contacto y coeficiente de fricción entre tambor y banda.

Tambor motriz				
Revestido		Desnudo		
	seco	húmedo	seco	húmedo
Coeficiente $\mu$	0.40	0.35	0.35	0.2

Cabezal motriz	Ángulo de contacto (°)
	120
	150
	180
	210
	220
	230
	240
	360
	380
	400
	420
	440
	450

### **Tensión en el lado flojo T2**

Generalmente, la tensión en el lado flojo es obtenida por un contrapeso de gravedad o por un tensor de husillo. Es preferible emplear contrapesos de gravedad dado que mantienen la misma tensión de forma constante, en especial en bandas largas.

Para el caso de tensor manual o de husillo, los valores del factor de accionamiento  $m$  deberán ser incrementados de tal forma que se produzca un aumento del 20% en la tensión del lado tenso  $T1$ . Esto se hace solo con el fin de suministrar una reserva de tensión adicional debida a la carencia de control de las tensiones y a las inexactitudes e intermitencias producidas por la utilización del tensor manual.

La tensión  $T2$  se puede obtener de dos maneras siguiendo el mismo proceso que en las ecuaciones precedentes.

$$T_2 = T_e \left( \frac{1}{e^{\mu\theta} - 1} \right)$$

$$T_2 = T_1 - T_e$$

Donde:

$T_2$  : Tensión en el lado flojo (N/m).

$T_e$  : Tensión efectiva (N/m).

En ciertas bandas, por ejemplo en bandas descendentes con accionamiento en la cola, se puede requerir una tensión del lado flojo más grande de la que se ha calculado con las ecuaciones previas. En estos casos, la tensión del lado flojo debe ser incrementada para garantizar la tensión mínima necesaria en el punto de tensión mínima del sistema.

### **Tensión en el retorno de la banda T3**

Considerando el gráfico de la Figura 26 donde se muestran las tensiones principales que aparecen en la banda transportadora, las tensiones  $T1$  y  $T2$  correspondientes a la tensión en lado tenso y en el lado flojo respectivamente ya han sido estudiadas. Por otra parte, las tensiones  $T3$  y  $T4$  no son completamente iguales debido a la fricción producida en los cojinetes del tambor, pero en la práctica se las considera iguales, de modo que:

$$T_3 = T_4$$

La tensión  $T3$  se conoce como tensión en el retorno y se puede determinar de la siguiente manera.

$$T_3 = CfL \left( G_b + \frac{G_{ru}}{S_2} \right) g + T_2$$

Donde:

$T_3$  : Tensión en el retorno ( $N/m$ ).

$C$  : Coeficiente de fricción por longitud.

$f$  : Coeficiente de fricción de las partes móviles.

$L$  : Longitud total de la banda (proyección horizontal) ( $m$ ).

$G_b$  : Peso de la banda ( $kg/m$ ).

$G_{ru}$  : Peso de los rodillos inferiores ( $kg$ ).

$S_2$  : Espaciamiento de los rodillos inferiores ( $m$ ).

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

$T_2$  : Tensión en el lado flojo ( $N/m$ ).

### **Tensión en el contrapeso $T_{cp}$**

El dispositivo de contrapeso puede ser ubicado en cualquier lugar a lo largo del ramal de retorno, de tal forma que no es necesario que esté situado adyacente al cabezal motriz, aunque esta sea a menudo la ubicación más conveniente.

Dos consideraciones principales gobiernan la ubicación del contrapeso en la mayoría de los casos. La primera hace referencia a la geometría de la banda transportadora. Frecuentemente, el cabezal motriz termina en un nivel mucho más alto que el cabezal de alimentación lo que proporciona suficiente altura para ubicar un contrapeso vertical. En segundo lugar hay que tener en cuenta la distribución de las tensiones alrededor de la banda. Si un análisis de las tensiones en la banda muestra algún punto donde la tensión es baja, como en el pie de una pendiente, el contrapeso puede ser ubicado allí.

Dependiendo de la ubicación del dispositivo tensor de contrapeso en la trayectoria de la banda transportadora (Figura 26), el valor de la tensión del contrapeso puede ser:

$$T_{cp} = 2T_2 \text{ (si el contrapeso se coloca cerca del grupo motriz).}$$

$$T_{cp} = 2T_3 \text{ (si el contrapeso se coloca cerca de la cola) .}$$

Donde:

$T_{cp}$  : Tensión en el contrapeso ( $N/m$ ).

$T_3$  : Tensión en el retorno ( $N/m$ ).

$T_2$  : Tensión en el lado flojo ( $N/m$ ).

### **Tensión debida al peso de la banda en una pendiente**

En todas las bandas transportadoras inclinadas, el peso de la banda en el trayecto inclinado provoca una tensión en la parte superior de la pendiente. Esta tensión puede ser expresada de la siguiente forma:

$$T_{pendiente} = (G_b H g) / e B$$

Donde:

$T_{pendiente}$  : Tensión por el peso de la banda en pendiente ( $N/m$ ).

$G_b$  : Peso de la banda ( $kg/m$ ).

$H$  : Altura neta de elevación o descenso del tramo inclinado ( $m$ ).

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

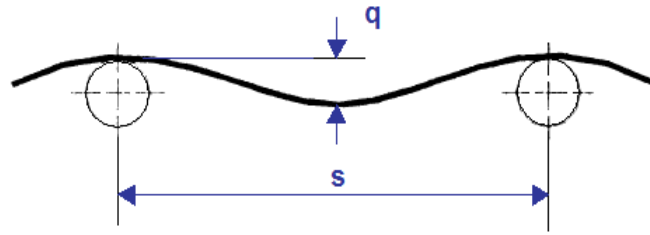
$e$  : Espesor de banda ( $m$ ).

$B$  : Ancho de banda ( $m$ ).

Esta tensión deberá sumarse o restarse en el cálculo de las tensiones en la banda, dependiendo de si la pendiente de la banda favorece o no el transporte del material, es decir, si la banda tiene sentido ascendente la tensión debida al peso de la misma aumenta y deberá tener signo positivo. Por el contrario, si la banda descende, la tensión debida al peso de la misma favorece el transporte y deberá restarse en el cómputo total.

### **Tensión mínima $T_0$**

A veces puede suceder que la tensión  $T_2$ , aún siendo lo suficientemente elevada como para lograr la adherencia de la banda al tambor motriz, es insuficiente para evitar el pandeo excesivo de la banda entre los rodillos, pudiéndose provocar así el derrame del material (Figura 27).



**Figura 27.** Flecha o pando de la banda.

Para evitar esta flecha excesiva se debe procurar que en ningún punto de la banda aparezca una tensión inferior a la tensión mínima  $T_0$ , tensión que puede ser calculada mediante la siguiente ecuación.

$$T_0 = \frac{s(G_b + M_{pm})}{8(q/s)} g$$

Donde:

$T_0$  : Tensión mínima de la banda (N/m).

$s$  : Espaciamiento de los rodillos (m).

$G_b$  : Peso de la banda (kg/m).

$M_{pm}$  : Carga del material por metro de banda (kg/m).

$q$  : Flecha permisible (entre 0.005 y 0.02 m) (m).

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

La carga del material por metro de banda puede ser calculada de la siguiente manera.

$$M_{pm} = \frac{Q_t}{3,6v}$$

Donde:

$Q_t$  : Capacidad máxima de la banda (ton/h).

$v$  : Velocidad de la banda (m/s).



**Tensión de trabajo unitaria  $T_u$** 

La tensión de trabajo unitaria es la máxima tensión a la que estará sometida la cinta transportadora por milímetro de ancho de banda. Con este valor se procede a seleccionar el tipo de banda transportadora en función del tipo de material y sus características como abrasividad, temperatura, peso específico, tamaño de grano, etc. según los tipos de bandas transportadoras proporcionadas por el fabricante en sus catálogos.

La tensión de trabajo unitaria suele expresarse en N/mm y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$T_u = \frac{T_1}{1000}$$

Donde:

$T_u$ : Tensión de trabajo unitaria (N/mm).

$T_1$ : Tensión en el lado tenso (N/m).

### **4.3. SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE LA BANDA**

#### **4.3.1. Selección de la banda**

Como ya se ha comentado anteriormente, la cinta transportadora es el elemento más importante de todo el conjunto mecánico ya que puede representar hasta el 60% del coste total del transportador. El material para bandas transportadoras más comúnmente utilizado es el caucho. Las bandas de caucho se construyen en base a dos componentes fundamentales: la carcasa y la cubierta (o cobertura).

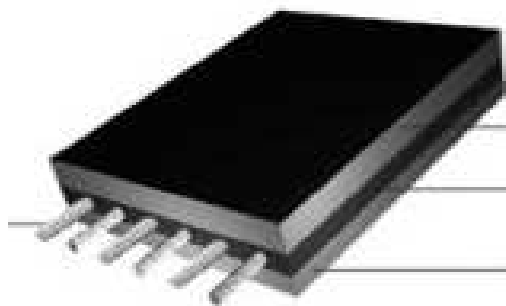
#### 4.3.1.1. La Carcasa

La carcasa es el esqueleto o alma de la banda y puede construirse con varias capas, según la necesidad. La función de la carcasa es la de transmitir y absorber las fuerzas que actúan en la banda. Estas se deben principalmente a las tensiones producidas por la acción del tambor motriz. Adicionalmente, la carcasa absorbe el impacto cuando el material es cargado sobre la cinta y cuando la banda con material pasa sobre los rodillos superiores.

Tal y como se comentó en capítulos anteriores, existe una gran variedad de materiales destinados a la fabricación de bandas, sin embargo, en el presente documento se han considerado los dos tipos de bandas más utilizados, las textiles y las plásticas con refuerzo interior metálico.

#### **Carcasa plástica con refuerzo metálico**

La carcasa con refuerzo metálico se caracteriza por poseer unos cordones metálicos embebidos en una matriz de material plástico o goma y que a su vez se encuentra situada entre dos cubiertas (Figura 28).



**Figura 28.** Carcasa de la banda plástica con refuerzo interior metálico.

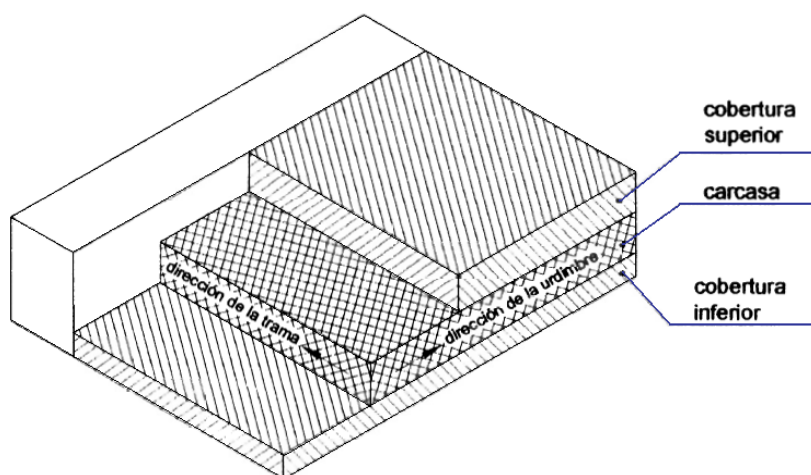
La Tabla 20 muestra los valores del diámetro máximo de cordón recomendados para bandas metálicas tipo ST en función de la tensión de trabajo a la que esté sometida la cinta [13].

**Tabla 20.** Diámetro máximo del cordón en una banda metálica.

Bandas metálicas ST		
Denominación	Tensión de trabajo (kg/cm)	Diámetro máx. cordón (mm)
ST 1000	100	4,1
ST 1250	125	4,9
ST 1600	160	5,6
ST 2000	200	5,6
ST 2500	250	7,2
ST 3150	315	8,1
ST 3500	350	8,6
ST 4000	400	8,9
ST 4500	450	9,7
ST 5000	500	10,9
ST 5400	540	11,3

### Carcasa textil

La carcasa textil consiste en una o más capas de tejido textil con caucho a cada lado para conferirle adhesión y flexibilidad. La dirección longitudinal se denomina urdimbre (*warp direction* en inglés) y la dirección transversal se denomina trama (*weft direction* en inglés) (Figura 29).

**Figura 29.** Estructura interna de la banda textil.

Los tejidos de las bandas transportadoras pueden tener el mismo o diferente material, tanto en la urdimbre como en la trama. Cada material se identifica mediante una letra (Tabla 21).

**Tabla 21.** Letras identificativas de materiales.

Letras identificativas	Material del tejido
B	Algodón
Z	Viscosilla
R	Rayón
P	Poliamida
E	Poliéster
D	Aramida
G	Fibra de vidrio

A continuación se describen los materiales más utilizados en la fabricación de la carcasa de las bandas transportadoras textiles. Entre los tejidos naturales, el algodón es el que más ampliamente ha venido empleándose durante muchos años, pero en la actualidad está siendo desplazado por los tejidos sintéticos.

### **Polyester (E)**

Los tejidos de polyester tienen la característica de que no se ven afectados por la humedad o por los microorganismos. Son muy flexibles, estables en su longitud y resistentes a los ácidos.

### **Polyamida (P)**

Se trata de fibras sintéticas conocidas como nylon y perlón. Actualmente, las características de alta elasticidad del nylon pueden ser controladas, por lo que los tejidos de este material están siendo extensamente utilizados en bandas para transporte y elevación.

Tienen una buena resistencia a la humedad además de una excelente resistencia al abuso y al impacto, haciendo de este un material muy apropiado para todo tipo de servicios.

### **Algodón-Nylon**

Este tipo de tejidos combina diferentes materiales en su manufactura. Las fibras de la urdimbre son elaboradas con algodón, en algunos casos reforzadas con nylon, mientras que las fibras de la trama son fabricadas con nylon o una combinación de nylon y algodón. Con nylon en la trama, la resistencia transversal es mucho más grande que en los tejidos de algodón y a menudo incrementan también la resistencia longitudinal. Este tipo de bandas se emplea para servicios medianamente pesados.

### **Polyester-Polyamida (EP)**

Los tejidos EP están constituidos por poliéster en la urdimbre y poliamida en la trama. Esta combinación produce las mejores características posibles en la cinta con las siguientes ventajas:

- Alta resistencia en proporción al peso.
- Alta resistencia al impacto.
- Elongación despreciable.
- Gran flexibilidad, excelente adaptación a la artesa (acanalamiento).
- No son susceptibles a la humedad y microorganismos.

La Tabla 22 muestra los números de lonas y espesores totales de carcasa recomendados para bandas textiles tipo EP en función de la tensión de trabajo a la que se encuentren sometidas [14].

**Tabla 22.** N° de lonas y espesores de carcasa en bandas textiles EP.

Bandas textiles EP			
Denominación	Tensión de trabajo (kg/cm)	Nº de lonas	Espesor total carcasa (mm)
EP 315/2	32	2	2,5
EP 400/3	40	3	3,8
EP 500/3	50	3	3,8
EP 500/4	50	4	4,9
EP 630/3	63	3	3,8
EP 630/4	63	4	4,9
EP 800/4	80	4	4,9
EP 800/5	80	5	6,1
EP 1000/4	100	4	4,9
EP 1000/5	100	5	6,1
EP 1250/4	125	4	4,9
EP 1250/5	125	5	6,1
EP 1600/4	160	4	4,9
EP 1600/5	160	5	6,1
EP 2000/5	200	5	6,1
EP 2500/5	250	5	6,1

#### 4.3.1.2. La Cubierta

La cubierta protege a la carcasa de la abrasión y cualquier otra condición local que contribuya al deterioro de la banda. En algunos casos muy concretos, estas condiciones pueden ser moderadas de tal forma que no se requiere protección ni cobertura para la banda. En otros casos, la abrasión y el corte pueden ser tan severos que se requiera una cubierta superior más gruesa de lo normal. De cualquier modo, el propósito de la selección de la cubierta es suministrar suficiente protección a la carcasa con el fin de que llegue al límite de su vida útil.

La cubierta inferior y superior protegen la carcasa, proveen adherencia con los tambores y resisten las influencias externas del material y los rodillos. También son las encargadas de crear la fricción necesaria entre la banda y el tambor motriz así como entre la banda y el material.

Debido a que la cubierta debe resistir las influencias externas tanto del material que se transporta como del ambiente exterior, se requieren tipos de cubierta que resistan el desgaste, resistentes al calor y/o a los aceites, o alguna combinación de dos o más de estas propiedades.

La cubierta del lado de la polea motriz es generalmente más delgada que la del lado del material debido a la diferencia de resistencia al desgaste que se requiere. Sin embargo, algunas veces se tiene el mismo espesor de cubierta en ambos lados de la banda.

Determinar la construcción de la cinta transportadora significa calcular la combinación adecuada de carcasa y cobertura. Esta combinación dará como resultado una construcción correcta para que la banda trabaje sin problemas. Para decidir el mejor diseño de la banda se debe tener en consideración la potencia necesaria, el tipo de material, el tamaño de terrón, la altura de caída del material y el peso específico, entre otras características. De esta forma, la carcasa debe proporcionar estabilidad a la banda para que sea fácil guiarla sobre el transportador, teniendo en cuenta que un aumento de la resistencia de la carcasa conlleva normalmente un incremento en el grosor y la calidad de la cobertura, asegurando un balance adecuado entre la vida útil de la carcasa y la cobertura.

Considerando todos los comentarios anteriormente expuestos, a continuación se muestra la Tabla 23 con valores recomendados para el espesor del recubrimiento superior en función del tamaño máximo de grano, tiempo de recorrido desde el punto de carga hasta el de descarga y abrasividad del material a transportar, correspondiéndose la letra A con un material altamente abrasivo, la B con uno moderado y la C con uno poco abrasivo [14].

**Tabla 23.** Espesores del recubrimiento superior de la banda.

Espesor recubrimiento superior (mm)									
Grado de abrasividad	A			B			C		
Tamaño de grano máx. (mm)	0-50	50-150	>150	0-50	50-150	>150	0-50	50-150	>150
Tiempo recorrido (min)									
< 0,2	5 - 6	6 - 8	8 - 10	3 - 5	5 - 6	6 - 8	2-3	3 - 4	4 - 6
0,2 - 0,4	4 - 5	5 - 6	6 - 8	3 - 4,5	≥ 5	≥ 6	2 - 2,5	2,5 - 4	4 - 5
0,4 - 1	4 - 5	≥ 6	≥ 8	3 - 4	4 - 5	5 - 6	2 - 2,5	2,5 - 3,5	3,5 - 4
1 - 5	3 - 5	5 - 6	7 - 8	3 - 5	4 - 5	5 - 6	2 - 2,5	2,5 - 3,5	3,5 - 4
> 5	3 - 5	5 - 6	7 - 8	3 - 5	4 - 5	5 - 6	2 - 2,5	2,5 - 3,5	3,5 - 4

La Tabla 24 muestra los valores recomendados de los espesores del recubrimiento inferior en función del superior [14].

**Tabla 24.** Espesores del recubrimiento inferior de la banda.

Espesor superior (mm)	Espesor inferior (mm)
2 - 3	1,5
4 - 5	2
6	1,5 - 3
8 - 10	2 - 3

#### 4.3.1.3. Determinación del peso de la banda

Es importante que la banda sea transportada y almacenada correctamente ya que de lo contrario se podrían producir daños, incluso antes de ser montada. Para el correcto manejo de la banda es conveniente conocer el peso y el diámetro del rollo de banda.

En el caso de que la banda sea de múltiples capas o lonas, el peso de un rollo de banda se calcula de la siguiente forma.

$$W_b = W_R + W_C$$



Donde:

$W_b$  : Peso de la banda por unidad de área ( $kg/m^2$ ).

$W_R$  : Peso de la carcasa ( $kg/m^2$  por capa)  $\times$  número de capas.

$W_C$  : Peso de la cubierta ( $kg/m^2$  por mm)  $\times$  milímetros de espesor de cubierta.

Luego, el peso total del rollo de banda será:

$$W_{Tb} = G_b (2L_t + \pi D)$$

Donde:

$W_{Tb}$  : Peso total del rollo de banda ( $kg$ ).

$G_b$  : Peso de la banda por unidad de longitud ( $kg/m$ ).

$L_t$  : Longitud total de la trayectoria de la banda ( $m$ ).

$D$  : Diámetro de los tambores ( $m$ ).

#### 4.3.1.4. Determinación del diámetro del rollo de banda

El diámetro del rollo de banda (Figura 30) puede también ser calculado de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$D_b = \sqrt{\frac{4t_b (2L_t + \pi D)}{\pi}} + d$$

Donde:

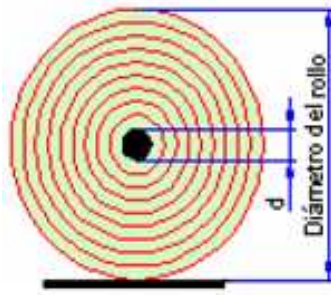
$D_b$  : Diámetro del rollo de banda ( $m$ ).

$t_b$  : Espesor de la banda (espesor cubierta + espesor carcasa) ( $m$ ).

$L_t$  : Longitud total de la trayectoria de la banda ( $m$ ).

$D$  : Diámetro de los tambores ( $m$ ).

$d$  : Diámetro del tambor de enrollamiento ( $m$ ).



**Figura 30.** Rollo de banda.

### **4.3.2. Selección de los rodillos superiores y de retorno**

#### **4.3.2.1. Características de los rodillos**

##### **Rodillos superiores**

Los rodillos superiores son los encargados de formar la cama de recorrido del material sobre la banda. Dada la gran importancia que tienen los rodillos en una cinta transportadora, estos han sido objeto de normalización por parte de los fabricantes en lo que concierne a sus medidas exteriores, con el propósito de lograr una mejor y más fácil intercambiabilidad entre rodillos.

Los rodillos superiores más comúnmente empleados son los de artesa con tres rodillos de igual longitud y con ángulos de inclinación de  $20^\circ$ ,  $35^\circ$  o  $45^\circ$ . En su momento, los rodillos de  $20^\circ$  fueron el estándar en muchas de las aplicaciones, dejando los rodillos de  $35^\circ$  y  $45^\circ$  solamente para el transporte de granos y materiales ligeros. Sin embargo, y más recientemente, los rodillos con ángulos mayores, especialmente los de  $35^\circ$ , están siendo empleados muchos más ampliamente en aplicaciones industriales regulares.

Las dos principales razones para utilizar rodillos con ángulos grandes ( $35^\circ$  y  $45^\circ$ ) son una mayor capacidad de transporte y un mayor control sobre el derrame del material, especialmente de gruesos. A continuación se muestran unos comentarios a tener en cuenta cuando el ángulo de inclinación es grande.

- Todos los elementos de la banda se vuelven más pesados (y por ello más costosos) para poder soportar apropiadamente la carga adicional.
- La distancia de transición en los tambores debe ser más grande para poder mantener las tensiones adecuadas, tanto en el centro como en los filos de la banda.
- Los radios de curvatura verticales deben ser superiores para mantener las tensiones adecuadas, tanto en el centro como en los filos de la banda.

A la hora de seleccionar el tipo de rodillos, también se debe tener en cuenta que existen rodillos para propósitos especiales. Algunos de esos rodillos y su ámbito de aplicación se describen a continuación:

- Rodillos para clasificación: constituidos por rodillos cortos de  $20^\circ$  de artesa y un rodillo central largo. Son empleados en bandas para recolección, clasificación y alimentación de bienes.
- Rodillos con rodillo central largo: similares a los rodillos para clasificación pero tienen ángulos de artesa de  $35^\circ$  y  $45^\circ$  de forma que el alto ángulo de inclinación ayuda a controlar el derrame. Son ampliamente empleados en el transporte de granos, serrín y otros materiales ligeros.
- Rodillos en terna desfasados: en esencia, realizan el mismo trabajo que los rodillos en terna sin desfase de igual longitud. La diferencia es que los tres rodillos son más grandes y el rodillo central está montado fuera de la línea del eje creado por los otros dos rodillos y por delante de ellos. Esta disposición resulta beneficiosa en bandas en las que se ha eliminado el intervalo entre rodillos y los puntos de contacto con la banda están más alejados de los rodillos finales, protegiendo de esta forma la cubierta de la banda de daños ocasionados por un exceso de grasa en los rodillos.
- Rodillos de impacto: creados con varios diseños, estos rodillos son empleados para absorber el impacto en el punto de alimentación del material.

- Rodillos autoalineantes: también fabricados en varios diseños, son empleados para ayudar a guiar la cinta sobre los rodillos.
- Rodillos de transición: son rodillos especiales que sirven para cambiar la sección transversal de la banda de forma gradual, desde una sección en artesa a una sección plana en los extremos del transporte.
- Rodillos especiales de tipo catenaria: se trata de rodillos montados sobre un cable flexible de acero para formar una curva catenaria.
- Rodillos en espiral: proveen amortiguación al impacto y además pueden asumir cualquier ángulo de artesa según lo demande el peso de la carga del material.

### **Rodillos inferiores**

Los rodillos inferiores son los encargados de soportar a la cinta transportadora en su trayectoria de retorno sin material. En este caso, como en el anterior, los fabricantes proporcionan las características técnicas de dichos rodillos así como su disposición interna y constructiva.

Hay que tener en cuenta que los rodillos de retorno o inferiores están sujetos a condiciones de servicio tan severas como las de los rodillos superiores. Esto se debe al mayor espaciamiento entre rodillos, mayor intervalo entre rodamientos, mayores cargas en los cojinetes y operación en contra del lado sucio de la banda. Consecuentemente, los rodillos de retorno suelen ser de igual diámetro que los rodillos superiores.

La longitud de los rodillos de retorno es particularmente importante dado que la mayoría de los daños producidos en los filos de la banda son ocasionados debido al rozamiento de la cinta con la estructura de la banda durante el retorno. Debido a estos factores, la longitud y espaciamiento entre los rodillos de retorno debería ser como mínimo el ancho de la superficie de los tambores.

Al igual que sucedía en el caso de los rodillos superiores, existen distintos tipos de rodillos de retorno dependiendo de varias condiciones, como por ejemplo el tipo de material a transportar o las condiciones ambientales que tenga que soportar la banda transportadora. A continuación se detallan algunos de estos diseños.

- Rodillos de retorno con discos de goma: soportan la banda en el retorno sobre un grupo de discos de goma o recubiertos de goma. Son empleados en bandas que transportan material pegajoso que tiende a apelmazarse sobre los rodillos convencionales hechos de tubo de acero. La concentración de presión en los discos y su deflexión tienden a impedir que el material se pegue. Este tipo de rodillos no debe ser utilizado con bandas que no permanezcan planas en el recorrido de retorno.
- Rodillos con manga de goma: en bandas que tienden a permanecer cóncavas hacia la cubierta superior, se producen fuerzas hacia abajo entre los discos de forma que se trasmite el peso entero de la carga sobre los discos ubicados cerca de los extremos, ocasionando un rápido desgaste de los mismos. Esta tendencia a permanecer cóncava hacia el lado superior se presenta en algunos tipos de banda, particularmente en aquellas con un tejido de carcasa diseñado para conseguir una gran flexibilidad transversal, y cualquier banda con una carcasa liviana y cubierta superior pesada. Cuando se dan estas condiciones, resulta efectivo emplear un rodillo de retorno que consta de discos espaciados en la zona central y una manga de goma en los extremos del rodillo.
- Rodillos en espiral o helicoidales: también combinados con rodillos tipo jaula con tablillas transversales para minimizar el apelmazamiento del material.

#### **4.3.2.2. Selección de los rodillos**

El parámetro fundamental en el proceso de selección de los rodillos será el diámetro. Los rodillos para bandas transportadoras poseen ejes, carcasas, rodamientos y sellos diseñados para una utilización más pesada a medida que se incrementa el diámetro del rodillo. La selección del diámetro del rodillo está influenciada por la

velocidad, peso tanto del material como de la banda, tamaño de grano del material y expectativa de vida útil.

Por todo lo anteriormente comentado, para hacer una selección apropiada de los rodillos se deben consultar los catálogos de los fabricantes, sin embargo y de modo general, se pueden tomar valores de la Tabla 25. En ella se reflejan diámetros de rodillos que cumplen las normas DIN, ISO, UNE y FEM y que son los valores recomendados en función del tipo de servicio y ancho de banda.

**Tabla 25.** Diámetros de rodillos recomendados.

Diámetros de rodillos que cumplen normas DIN, ISO, UNE y FEM (mm)		
63,5/ 89/ 102/ 108/ 127/ 133/ 152/ 159/ 177/ 193		
Referencia según fabricante Kauman		
Diámetros recomendados según el tipo de servicio		
Clase de servicio	Diámetro rodillo (mm)	Ancho banda (mm)
Ligero	102-127	300-1000
	102-127	1000-1600
Medio	102-127	300-1000
	127-152	1000-1400
	127-159	1400-1800
Pesado	152-159	800-1400
	177-193	1400-2200
Referencia según catálogo 1040R Rexnord Belt Conveyors		

### 4.3.3. Selección de los tambores de carga y descarga

El diseño de tambores implica determinar el ancho de cara, el diámetro de tambor y la distancia entre apoyos. A continuación van a explicarse detalladamente cada uno de estos conceptos.

#### 4.3.3.1. Determinación del ancho de cara del tambor

Para determinar el ancho de cara de los tambores es necesario conocer el ancho de la banda y aplicar las siguientes ecuaciones según sea el caso.

$$F = B + 0,05 \quad \text{si} \quad B < 1$$

$$F = B + 0,075 \quad \text{si} \quad B > 1$$

Donde:

$F$  : Ancho de cara del tambor ( $m$ ).

$B$  : Ancho de banda ( $m$ ).

Se debe revisar el catálogo del fabricante para comprobar que existe el tamaño de cara de tambor que se requiere. En caso contrario, se debe seleccionar el mínimo ancho de cara ofrecido por el fabricante que cumpla las ecuaciones anteriores.

#### 4.3.3.2. Determinación del diámetro de tambor

La selección del diámetro de tambor apropiado depende principalmente del tipo y espesor de la banda seleccionada. Como se mencionó anteriormente, la banda consta de una carcasa compuesta de fibras sintéticas o de acero embebida en un recubrimiento de goma llamado cubierta. Cuando la cinta se arrolla sobre los tambores, las fibras internas se comportan como una lámina metálica curva, es decir, las fibras más alejadas del centro están sometidas a una mayor tensión que las más próximas.

Pueden aplicarse las formulas clásicas de resistencia de materiales para determinar las tensiones en las fibras exteriores de la banda en función del número de capas, los diámetros de los tambores y el esfuerzo tangencial aplicado sobre la misma. A continuación se muestra la ecuación para calcular el diámetro del tambor [15].

$$D_{\min} = \frac{360F}{p\pi\phi B}$$

Donde:

$F$  : Fuerza de accionamiento ( $kg$ ).

$p$  : Capacidad de transmisión tambor/banda ( $1600$  a  $2000\ kg/m^2$ ).

$\varphi$  : Ángulo de arrollamiento ( $^{\circ}$ ).

$B$  : Ancho de banda ( $m$ ).

Debido a que la aplicación de esta fórmula supondría estudiar cada caso individualmente, los fabricantes de bandas indican el diámetro mínimo recomendado que se debe emplear. La Tabla 26 muestra los diámetros normalizados s/DIN 22101 recomendados por Dodge en función de la tensión de trabajo unitaria  $T_u$  en N/mm y del arco de contacto entre la cinta y el tambor.

**Tabla 26.** Diámetros de tambores recomendados.

Arco de contacto ( $^{\circ}$ )	Diámetro del tambor (mm)													
	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1400	1600	1800	2000	2200
30	8	10	11	18	25	31	40	61	71	81	91	101	111	121
40	6	8	10	15	21	26	35	52	61	69	78	87	95	104
50	5	7	8	12	18	23	30	45	53	60	68	76	83	91
60	5	7	8	12	18	22	29	44	51	58	66	73	80	88
70	5	7	9	13	18	23	31	46	53	61	69	77	84	92
80	6	8	9	14	20	25	33	50	58	66	75	83	91	100
90	6	8	10	15	21	26	35	53	62	71	80	89	98	107
100	7	9	11	16	23	28	38	57	67	75	85	94	103	112
110	8	10	11	1	20	25	31	51	61	81	91	106	120	134
120	8	10	11	18	25	32	43	64	75	86	96	107	118	128
130	9	11	13	20	28	35	46	70	82	94	105	117	129	140
140	10	12	14	22	32	39	53	79	92	105	118	131	144	157
150	11	13	16	25	35	44	59	89	103	118	132	147	161	175
160	12	15	18	28	39	49	66	98	114	131	147	164	180	196
170	13	17	20	31	44	54	73	109	127	146	163	182	200	218
180	15	18	22	34	48	61	81	121	141	161	182	202	222	243
190	13	17	20	31	44	54	73	109	127	146	163	182	200	218
200	12	15	18	28	39	49	66	98	114	131	147	164	180	196
210	11	13	16	25	35	44	59	89	103	118	132	147	161	175
220	10	12	14	22	32	39	53	79	92	105	118	131	144	157
230	9	11	13	20	28	35	46	70	82	94	105	117	129	140
240	8	10	11	18	25	32	43	64	75	86	96	107	118	128



#### 4.3.3.3. Determinación de la distancia entre apoyos

Los valores de la distancia entre apoyos del tambor (Figura 31) se determinan de acuerdo a la geometría de la estructura de la banda transportadora, pero de forma general pueden emplearse los valores recomendados de la Tabla 27 en función del ancho de la banda y del tipo de tambor.

**Tabla 27.** Distancia entre apoyos del tambor.

Ancho de banda (mm)	Distancia entre apoyos (mm)		
	Tambor motriz	Tambor de cola	Tambor adicional
400	760	760	630
450	810	810	680
600	1020	1020	840
750	1170	1170	990
900	1370	1370	1140
1050	1520	1520	1300
1200	1680	1680	1450
1350	1830	1830	1600
1500	1980	1980	1750
1650	2130	2130	1900
1800	2400	2400	2050
2100	2700	2700	2350
2400	3000	3000	2650
2500	3100	3100	2750



**Figura 31.** Distancia entre apoyos del tambor.

# **CAPITULO 5**

## **PROGRAMACIÓN DEL SOFTWARE**

### **5.1. LENGUAJE VBA**

#### **5.1.1. Introducción**

Visual Basic for Applications (VBA) es un lenguaje de programación que ha sido desarrollado por el alemán Alan Cooper para Microsoft. El lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes añadidos. Su primera versión fue presentada en 1991 con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y, en cierta medida, también la programación propiamente dicha. Desde 2001, Microsoft ha propuesto abandonar el desarrollo basado en la API Win32 y pasar a trabajar sobre un framework o marco común de librerías independiente de la versión del sistema operativo a través de Visual Basic .NET (y otros lenguajes como C Sharp ) consiguiendo de esta forma una fácil transición de códigos entre los diferentes sistemas.

Visual Basic constituye un IDE (entorno de desarrollo integrado, o en inglés *Integrated Development Enviroment*) que ha sido empaquetado como un programa de aplicación, es decir, consiste en un editor de código (programa donde se escribe el código fuente), un depurador (programa que corrige errores en el código fuente para que pueda ser compilado), un compilador (programa que traduce el código fuente al lenguaje de máquina), y un constructor de interfaz gráfica (es una forma de programar en la que no es necesario escribir el código para la parte gráfica del programa, sino que se puede hacer de forma visual) [16].

### **5.1.2. Características principales**

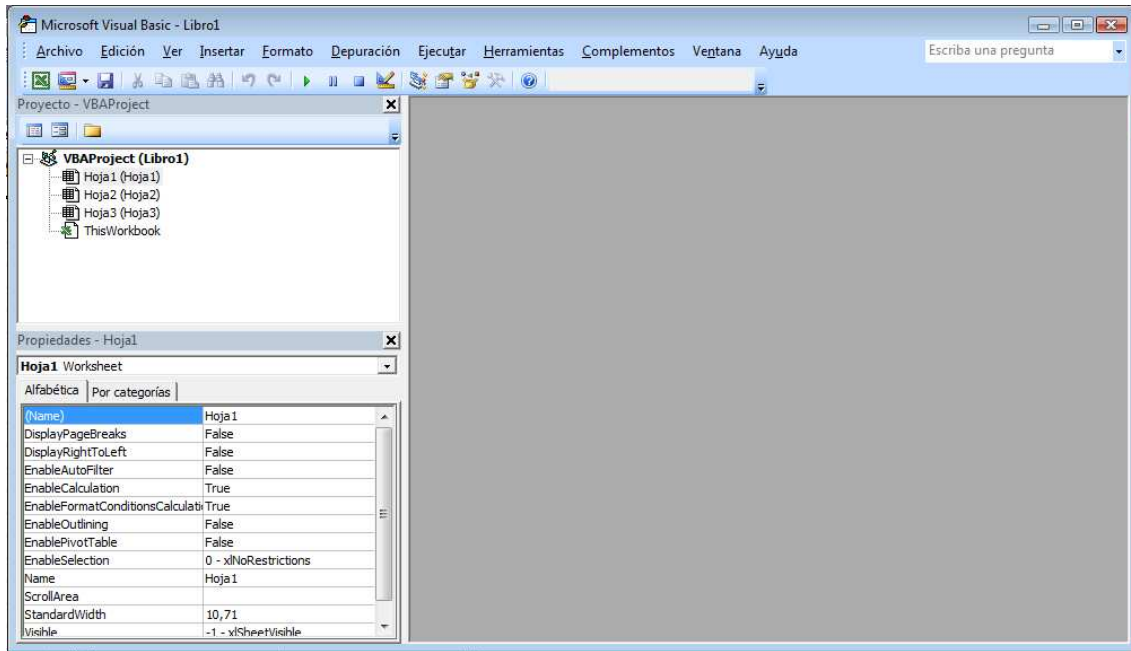
Para el desarrollo del software de diseño de la banda transportadora se ha utilizado el editor de Visual Basic (VB) que lleva incorporado Microsoft Office Excel. Este tipo de programación también se conoce como "Programación Orientada a Objetos" (OOP, *Objects Oriented Programming* en inglés). Mediante este método se consigue trabajar sobre los objetos característicos de Excel así como crear objetos propios.

En el proceso de programación del software con VB se han utilizado macros. Una macro es un conjunto de instrucciones de código programado que permite realizar una tarea determinada. De esta forma, mediante las macros se multiplican e incrementan las posibilidades y prestaciones de Excel. Más adelante se explicarán en detalle las macros que han sido utilizadas en la programación del software.

Para acceder al editor de Visual Basic una vez abierto Microsoft Excel existen tres posibilidades:

- A. Desde el menú Programador > Visual Basic.
- B. Desde el menú Programador > Ver código.
- C. Desde el teclado (teclas de método abreviado): ALT+F11.

La Figura 32 muestra el aspecto del editor de VB.



**Figura 32.** Editor de Visual Basic en Microsoft Excel.

El editor contiene tres ventanas principales: la ventana Proyecto (parte izquierda superior), la ventana Código (parte derecha) y la ventana Propiedades (parte izquierda inferior).

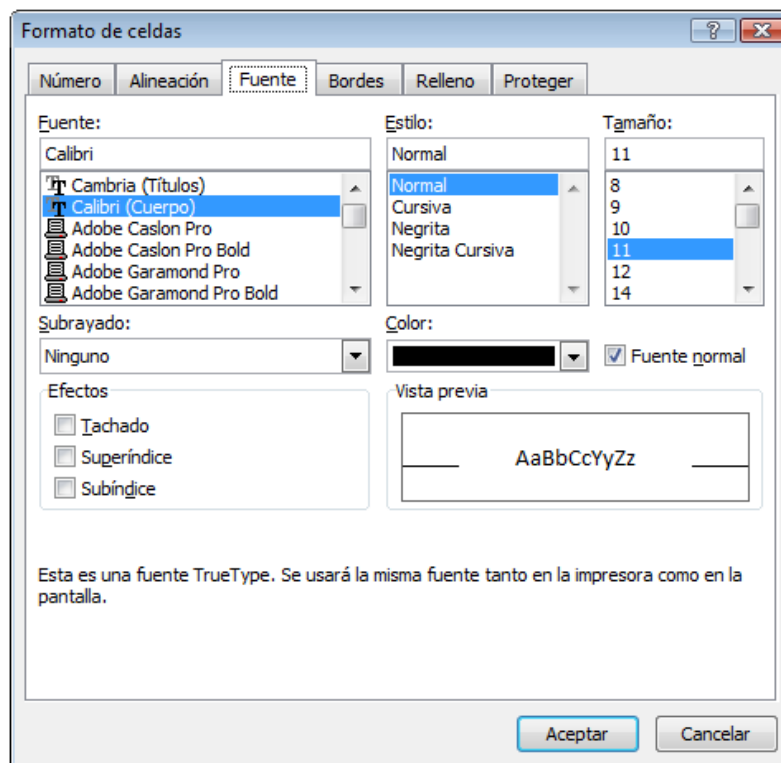
- La ventana Proyecto muestra los libros Excel (extensión .xls) o los complementos (extensión .xla) abiertos. En el caso de la Figura 32 puede verse cómo existe un libro excel llamado Libro 1 del que cuelgan las carpetas Hoja1, Hoja 2, Hoja 3 y ThisWorkbook. Haciendo doble clic sobre cada una de las carpetas se activará la ventana donde se escriben las macros. La carpeta ThisWorkbook siempre está activa y las macros contenidas en ella afectarán a todo el libro. La carpeta UseForm sirve para escribir macros vinculadas a formularios (más adelante se explicarán en detalle) y la carpeta Módulo sirve para escribir macros a nivel genérico, sin estar relacionadas con ninguna hoja o libro en particular.
- La ventana Código es el lugar donde se escribe el código propiamente dicho de las macros. En la Figura 32 esta ventana aparece en gris ya que no existe ninguna macro programada y como consecuencia ningún código escrito.

- La ventana Propiedades muestra un menú de las características principales del elemento que en ese momento se encuentre seleccionado. El menú puede ordenarse de manera alfabética o por categorías. En el caso de la Figura 32 puede verse el menú de la Hoja1 ordenado de manera alfabética.

### 5.1.3. Formularios (Userforms)

#### Introducción

Un Formulario (Userform en inglés) se utiliza para crear un cuadro de diálogo donde el usuario pueda introducir información. Este tipo de cuadros se utilizan mucho en todo tipo de programas. Por ejemplo, si en el programa Microsoft Excel se accede en el menú principal a la ventana de Fuente dentro del botón de Inicio, se abrirá un formulario como el que puede verse en la Figura 33 en el que se pueden activar o desactivar distintas opciones referentes al formato de celdas.



**Figura 33.** Ejemplo de un Formulario de Microsoft Excel.

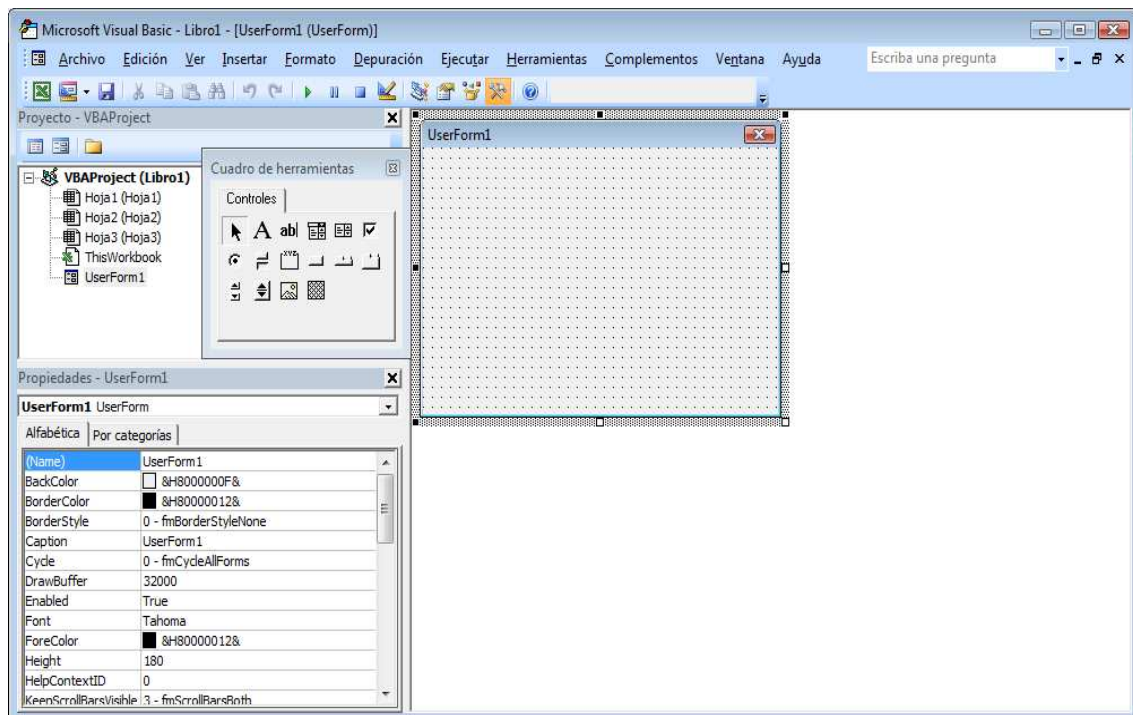
Los Userforms se utilizan mucho para crear aplicaciones Excel que permitan al usuario introducir datos o elegir opciones de una forma guiada e intuitiva. Como consecuencia de esto, ha sido este tipo de elementos el que se ha elegido para programar el software de cálculo de la banda transportadora.

A continuación se detallan las características y posibilidades que ofrecen los cuadros de dialogo creados mediante formularios.

### **Creación de un Userform**

Para crear un Userform se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir el editor de macros (por ejemplo, con CTRL+F11).
2. Seleccionar el libro excel donde se quiera trabajar.
3. Hacer clic con el botón derecho del ratón en el mismo y elegir la opción Insertar > Userform. En la Figura 34 puede verse un ejemplo.



**Figura 34.** Ejemplo de un Useform.

### **Controles de un Userform**

Para poder añadir diferentes tipos de objetos a un Userform se debe abrir la ventana de controles en el menú Ver > Cuadro de herramientas (Figura 35).



**Figura 35.** Cuadro de herramientas de un Userform.

A continuación se explican las características y funcionalidades de cada uno de los controles que pueden insertarse en un formulario.



Selección: sirve para seleccionar controles que hayan sido insertados previamente en el Userform.



Label: permite poner un título o un texto.

Ejemplo: se puede poner un texto del tipo "Complete las opciones a continuación" y ubicarlo en cualquier lugar dentro del Userform. También se pueden agregar títulos o descripciones asociados a algún elemento que aparezca en el Userform.



Textbox: sirve para que el usuario introduzca datos.

Ejemplo: cuando se quiere que el usuario introduzca una fecha o un nombre.



ComboBox: se utiliza para que el usuario elija una opción dentro de una lista.

Ejemplo: se crea una lista con los meses de Enero a Diciembre para que el usuario elija uno de ellos.



ListBox: sirve para que el usuario rellene o elija varias opciones de una lista.

Ejemplo: se crea una lista con regiones o ciudades y el usuario deberá elegir una o varias de ellas.



CheckBox: es utilizado para que el usuario active una determinada función.

Ejemplo: se puede querer que al cerrar el Userform se imprima un informe solo si la casilla de selección correspondiente está marcada.



OptionButton: permite al usuario marcar una opción determinada entre varias posibilidades.

Ejemplo: se quiere que el usuario indique si es de sexo masculino o femenino de forma que solo pueda elegir una de las dos opciones.



ToggleButton: se utiliza para activar o desactivar alguna funcionalidad de forma que este botón adopta el modo "encendido" / "apagado".

Ejemplo: se quiere que el usuario defina su idioma, resultando español en modo encendido e inglés en modo apagado.





Frame: sirve para agrupar elementos de un Userform (los elementos se deben ubicar dentro del Frame).

Ejemplo: se tienen varios grupos de OptionButton y TextBox relacionados con los datos personales de una persona y para agruparlos se ubican dentro de un Frame.



CommandButton: es un botón que permite ejecutar acciones.

Ejemplo: un botón de ayuda mediante el cual se ejecuta otro Userform que contiene información adicional de ayuda para el usuario.



TabStrip: se utiliza para crear distintas secciones dentro de un Userform.

Ejemplo: un Userform con tres secciones: datos personales, formación y experiencia, de forma que dentro de cada sección se pueden ubicar distintos controles.



MultiPage: sirve para crear diferentes páginas en un mismo Userform.

Ejemplo: un Userform con dos páginas, España y resto del mundo de forma que dentro de cada página se pueden ubicar distintos controles o diferentes secciones.



ScrollBar: permite navegar por una lista que contiene varios elementos.

Ejemplo: se tiene una lista con 150 países de forma que con el ScrollBar se puede subir y bajar por la lista utilizando las flechas de desplazamiento.



SpinButton: permite aumentar o disminuir valores.

Ejemplo: se tiene una lista con tipos de interés y se quieren incrementar o disminuir en cantidades predeterminadas.



**Image:** permite introducir imágenes en el Userform.

Ejemplo: se quiere introducir una fotografía como fondo del Userform para darle un aspecto más personalizado.

Una vez comentados y explicados los tipos de controles que se pueden utilizar, a continuación se va a detallar cada uno de los pasos que se han seguido en la programación del software para el diseño de la banda transportadora.

## 5.2. PROGRAMACIÓN DEL SOFTWARE

### 5.2.1. Interfaces

El programa ha sido concebido como una aplicación visual fácil de entender y utilizar. Consta de diez interfaces gráficas que guían al usuario en el diseño completo de una banda transportadora.

- La primera interfaz (Figura 36) muestra la portada del programa.



**Figura 36.** 1ª pestaña del software: Portada.

- La segunda ventana corresponde a las características del material que va a ser transportado (Figura 37).

Software par el cálculo y dimensionamiento de una banda transportadora

Portada | Material | Geometría | Fuerzas y Potencias | Tensiones | Motor | Rodillos | Tambores | Banda | Resultados

**Características del material**

Denominación:

Densidad aparente:  kg/m<sup>3</sup>

Ángulo de reposo:  °

Ángulo de sobrecarga:  °

Ángulo de máx. inclinación:  °

Temperatura:  °C


Tamaño máximo de grano:  mm

Elegir abrasividad:

Elegir% mezclado:

**Información de materiales**

Ver información



**Factor K1 en función del tamaño de grano**

Tamaño de grano (mm)	Peso específico del material (kg/m <sup>3</sup> )											
	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	4000	5000	6000	7000	8000
<100	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
100	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
150	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
200	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2
250	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2
300	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3
350	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4
400	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5
450	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5

Factor K1:

Aceptar

**Figura 37.** 2ª pestaña del software: Material.

El usuario deberá introducir las siguientes propiedades del material a transportar:

- Denominación.
- Densidad aparente.
- Ángulo de reposo, sobrecarga y máxima inclinación..
- Temperatura.
- Tamaño máximo de grano.
- Abrasividad.
- Tipo de mezcla.
- Factor de corrección debido al tamaño de grano.

Para poder obtener información de las propiedades de algunos materiales, podrá ayudarse de la ventana que aparece al pulsar el botón de información y que puede verse en la Figura 38.

Listado de materiales

[Lista de materiales y características asociadas a cada uno de ellos](#)

Material	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Ángulo de reposo (°)	Ángulo máx. inclinación (°)	Abrasividad	Material	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Ángulo de reposo (°)	Ángulo máx. inclinación (°)	Abrasividad
<a href="#">Arroz, gavillas</a>	90	24° a 26°	8°	C	<a href="#">Habichuelas</a>	775	24° a 26°	13°	C
<a href="#">Algodón, no apretado</a>	100	35° a 45°	19°	C	<a href="#">Arroz blanqueado</a>	800	24° a 26°	8°	C
<a href="#">Cacahuete con cáscara</a>	280	38°	18°	C	<a href="#">Guisantes</a>	800	24° a 26°	12°	C
<a href="#">Algodón, con su fibra</a>	420	25° a 27°	19°	C	<a href="#">Madera, virutas</a>	800	45°	27°	C
<a href="#">Café (granos secos)</a>	450	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Carbon</a>	850	27° a 35°	20°	B
<a href="#">Maíz, mazorcas peladas</a>	450	25° a 27°	10°	C	<a href="#">Cacao fresco</a>	900	26° a 30°	15°	C
<a href="#">Coque</a>	450	37° a 41°	18°	A	<a href="#">Caucho</a>	950	-	-	C
<a href="#">Avena</a>	520	27° a 29°	10°	C	<a href="#">Hielo triturado</a>	980	15°	-	B
<a href="#">Arroz cáscara</a>	550	24° a 26°	8°	C	<a href="#">Cemento</a>	1450	29°	19°	B
<a href="#">Harina refinada</a>	550	35° a 45°	20°	C	<a href="#">Arena</a>	1550	25° a 30°	24°	A
<a href="#">Cebada</a>	590	25° a 29°	14°	C	<a href="#">Grava</a>	1600	24° a 31°	16°	A
<a href="#">Lino</a>	600	24° a 26°	10°	C	<a href="#">Piedra</a>	1650	40°	20°	A
<a href="#">Cacahuete sin cáscara</a>	610	26° a 30°	30°	C	<a href="#">Mineral Hierro</a>	2100	35°	19°	B
<a href="#">Café (granos frescos)</a>	620	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Hormigón</a>	2450	-	-	B
<a href="#">Cacao (granos secos)</a>	635	26° a 30°	15°	C	<a href="#">Vidrio</a>	2500	-	-	B
<a href="#">Mijo</a>	700	24° a 26°	13°	C	<a href="#">Aluminio</a>	2700	-	-	B
<a href="#">Café comercial</a>	715	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Tierra</a>	5515	35°	20°	B
<a href="#">Arroz descascarado</a>	725	24° a 26°	8°	C	<a href="#">Estaño</a>	7310	-	-	B
<a href="#">Maíz, granos</a>	750	25° a 27°	10°	C	<a href="#">Acero</a>	7850	-	-	B
<a href="#">Soja, granos</a>	750	24° a 26°	14°	C	<a href="#">Cobre</a>	8960	-	-	B
<a href="#">Alfalfa, granos</a>	770	25° a 29°	14°	C	<a href="#">Plata</a>	10490	-	-	B
<a href="#">Triajo</a>	770	24° a 26°	12°	C	<a href="#">Plomo</a>	11340	-	-	B
<a href="#">Cacao fermentado</a>	775	26° a 30°	13°	C	<a href="#">Oro</a>	19300	-	-	B
<a href="#">Frijoles</a>	775	24° a 26°	16°	C	<a href="#">Platina</a>	21450	-	-	B

Figura 38. Ventana de información de propiedades de materiales.

- La tercera pestaña hace referencia a la geometría de la instalación así como a la capacidad de transporte del sistema (Figura 39).

Software para el cálculo y dimensionamiento de una banda transportadora

Portada | Material | Geometría | Fuerzas y Potencias | Tensiones | Motor | Rodillos | Tambores | Banda | Resultados

**Banda**

Ancho (normalizado):  mm [Info. ancho](#)

Velocidad (normalizada):  m/s [Info. velocidad](#)

**Tipo de rodillos superiores**

Tipo de rodillos:

Ángulo de rodillos:  °

**Geometría**

Longitud tramo horizontal:  m

Proyección horizontal tramo inclinado:  m

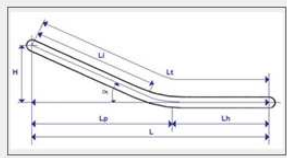
Longitud de elevación o descenso:  m

Pendiente:  °

Longitud tramo inclinado:  m

Longitud total (proyección horizontal):  m

Longitud total (trayectoria):  m



[Aceptar 1°](#) [Calcular 1°](#)

**Capacidad**

Capacidad requerida:  ton/h

Capacidad volumétrica efectiva:  m<sup>3</sup>/h

Capacidad de transporte:  ton/h

**Coefficiente de reducción capacidad debido a inclinación:**

(°)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
K	1	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,85	0,81

K debido a inclinación:

[Aceptar 2°](#) [Calcular 2°](#)

Figura 39. 3ª pestaña del software: Geometría.

El usuario deberá introducir los valores relacionados con la geometría y capacidad de la instalación que se muestran a continuación:


- Ancho de banda.
- Velocidad de la banda.
- Tipo y ángulo de los rodillos superiores.
- Longitud del tramo horizontal, del inclinado y del de elevación o descenso.
- Capacidad requerida.
- Coeficiente de reducción debido a la inclinación.

En el caso del ancho de banda, el usuario puede obtener información de ayuda pulsando el botón de información de anchos de bandas (Figura 40).

Ancho de banda recomendado

[Anchos de banda normalizados recomendados en función del tamaño de grano](#)

ANCHOS DE BANDA MINIMOS RECOMENDADOS		
Ancho de banda (mm)	Tamaños uniformes (mm)	Mezclado con 90% finos (mm)
400	50	100
500	75	150
650	125	200
800	175	300
1000	250	400
1200	350	500
1400	400	600
1600	450	650
1800	550	700
2000	600	750
2200	600	750




**Figura 40.** Ventana de información de anchos de banda normalizados.

De manera análoga, se podrá abrir una ventana adicional (Figura 40) en la que se muestra información acerca de las velocidades normalizadas así como de las máximas recomendadas.

Velocidad de banda recomendada

[Velocidad de banda normalizada y recomendada en función del tamaño de grano](#)

VELOCIDADES DE BANDA NORMALIZADAS (m/s) s/DIN 22101									
0,66	0,84	1,05	1,31	1,68	2,09	2,62	3,35	4,19	5,24
VELOCIDAD DE BANDA MÁX. RECOMENDADA (m/s)									
Ancho de banda (mm)	Tamaño de grano (mm)								
	< 30	30-300	>300						
400	2.09	1.68	1.31						
500	3.35	2.09	1.68						
650	3.35	2.09	1.68						
800	3.35	2.62	2.09						
1000	4.19	2.62	2.09						
1200	4.19	2.62	2.09						
1400	4.19	3.35	2.09						
1600	4.19	3.35	2.62						
1800	4.19	3.35	2.62						
2000	5.24	3.35	2.62						
2200	5.24	3.35	2.62						



**Figura 41.** Ventana de información de velocidades de banda normalizadas.

- La cuarta interfaz muestra los cálculos técnicos correspondientes a las fuerzas y potencias requeridas en la banda (Figura 42).

Software para el cálculo y dimensionamiento de una banda transportadora

Portada | Material | Geometría | **Fuerzas y Potencias** | Tensiones | Motor | Rodillos | Tambores | Banda | Resultados

Coefficiente de fricción partes giratorias

elegir factor

Buenos transportadores con rodaje suave y baja fricción interna del material: 0.017

Valor estándar para condiciones normales de trabajo: 0.020

Condiciones desfavorables con sobrecargas periódicas: 0.025

Transportadores descendentes que requieren frenado mecánico: 0.012

Coefficiente de fricción por longitud

Longitud total (proyección horizontal):  m

Coefficiente:

Peso de partes móviles

Peso banda:  kg/m

Peso rodillos superiores:  kg

Peso rodillos inferiores:  kg

Espaciamiento rodillos superiores:  m

Espaciamiento rodillos inferiores:  m

Peso total partes móviles:  kg/m

Cálculo de fuerzas

Fuerza para mover banda en vacío y componentes móviles:  N

Fuerza para desplazar material, componente horizontal:  N

Fuerza para desplazar material, componente vertical:  N

Fuerza Total:  N

Cálculo de potencias

Elegir tipo A, B ó C:

A. Longitud total guías:  m

B. Cantidad de carros:

A. Potencia requerida por guías de carga:  KW

B. Potencia requerida por carros:  KW

Potencia teórica total:  KW

Eficiencia del motor:  %

Eficiencia de la transmisión:  %

Potencia requerida:  KW

**Figura 42.** 4ª pestaña del software: Fuerzas y Potencias.

En esta pestaña el usuario debe introducir los siguientes valores:


- Coeficiente de fricción en partes giratorias.
- Peso de la banda, de los rodillos superiores y de los inferiores.
- Espaciamiento de los rodillos superiores.
- Espaciamiento de los rodillos inferiores.
- Elección de guías y carros descargadores.
- Eficiencia del motor y de la transmisión.

Para la elección del peso de la banda, se podrá abrir una ventana adicional de información (Figura 43) pulsando el botón de información de bandas.

Valores promedio del peso de banda

[Valores promedio del peso de la banda transportadora en función del tipo de servicio y ancho de banda](#)

Ancho de banda (mm)	Servicio liviano Peso específico < 1500 kg/m <sup>3</sup>	Servicio mediano 800 < Peso específico < 1500 kg/m <sup>3</sup>	Servicio pesado Peso específico > 1500 kg/m <sup>3</sup>
	Peso de la banda transportadora Gb (kg/m)		
400	3.0	4.5	6.0
500	6.0	7.5	9.0
650	7.5	9.0	10.5
800	9.0	10.5	12.0
1000	10.5	13.5	16.5
1200	13.5	16.5	21.0
1400	18.0	22.5	27.0
1600	21.0	27.0	33.0
1800	25.5	31.5	40.5
2000	30.0	36.0	48.0
2200	33.0	42.0	54.0



**Figura 43.** Pesos de bandas recomendado.


En el caso de los pesos y espaciamientos de los rodillos superiores e inferiores también se puede ver información adicional pulsando los botones correspondientes, mostrándose en pantalla las ventanas de la Figura 44 y Figura 45.



Valores promedio del peso de los rodillos

[Valores promedio del peso de rodillos superiores y de retorno en función del ancho de banda](#)

Ancho de banda (mm)	Servicio liviano Peso específico < 1500 kg/m3		Servicio pesado Peso específico > 1500 kg/m3	
	Gsup (kg)	Ginf (kg)	Gsup (kg)	Ginf (kg)
400	3.0	3.0	4.0	4.0
500	3.5	3.5	5.5	5.5
650	5.5	5.5	10	10
800	11	10	14	12
1000	13	11	18	16
1200	15	13	20	18
1400	22	20	31	27
1600	25	22	35	30
1800	39	35	47	40
2000	43	36	52	45
2200	47	40	56	47




**Figura 44.** Pesos de rodillos superiores e inferiores recomendados.

Valores recomendados de espaciamiento entre rodillos

[Valores recomendados de espaciamiento entre rodillos superiores e inferiores en función del ancho de banda y peso específico del material a transportar](#)

Ancho de banda (mm)	Espaciamiento rodillos superiores S1 (m)										Espaciamiento rodillos inferiores S2 (m)
	Peso específico del material (kg/m3)										
	500	800	1000	1400	1600	2400	3200	4000	5000	>6000	
400	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.2	0.9	0.75	3.0
500	1.5	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.60	3.0
650	1.5	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	0.9	0.9	0.5	3.0
800	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.5	3.0
1000	1.4	1.4	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.75	0.5	3.0
1200	1.4	1.4	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.75	0.5	3.0
1400	1.4	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.75	0.75	0.5	3.0
1600	1.2	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	0.75	0.60	0.5	3.0
1800	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9	0.75	0.75	0.60	0.5	0.5	2.4
2000	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9	0.75	0.75	0.60	0.5	0.5	2.4
2200	1.0	1.0	1.0	0.9	0.75	0.75	0.60	0.5	0.5	0.5	2.4



**Figura 45.** Espaciamientos recomendados en rodillos superiores e inferiores.



- En el quinto paso se muestran todas las tensiones creadas en la cinta transportadora, desde las preliminares obtenidas en un primer paso, hasta las finales calculadas en función de la tensión de contrapeso elegida por el usuario (Figura 46).

En este caso, el usuario debe introducir los valores que se muestran a continuación:

- Coeficiente de fricción entre banda y tambor.
- Ángulo de contacto entre banda y tambor.
- Tensión del contrapeso escogida.

**Software par el cálculo y dimensionamiento de una banda transportadora**

Portada | Material | Geometría | Fuerzas y Potencias | **Tensiones** | Motor | Rodillos | Tambores | Banda

Coeficiente de fricción Tambor-Banda

elegir factor

A. Tambor motriz revestido y seco	0.40
B. Tambor motriz revestido y húmedo	0.35
C. Tambor motriz desnudo y seco	0.35
D. Tambor motriz desnudo y húmedo	0.20

Ángulo de contacto del cabal motoriz

Ángulo contacto (°):

Coeficiente de accionamiento:

Tensión efectiva: N

Aceptar 1° Calcular 1°

Tensiones (Valores Preliminares)

Tensión 1 lado tenso: N Tensión del contrapeso mínima: N

Tensión 2 lado flojo: N

Tensión 3 de retorno: N

Tensiones (Valores Finales)

Tensión 1 lado tenso: N Tensión del contrapeso escogida: N

Tensión 2 lado flojo: N Tensión mínima (antipandeo): N

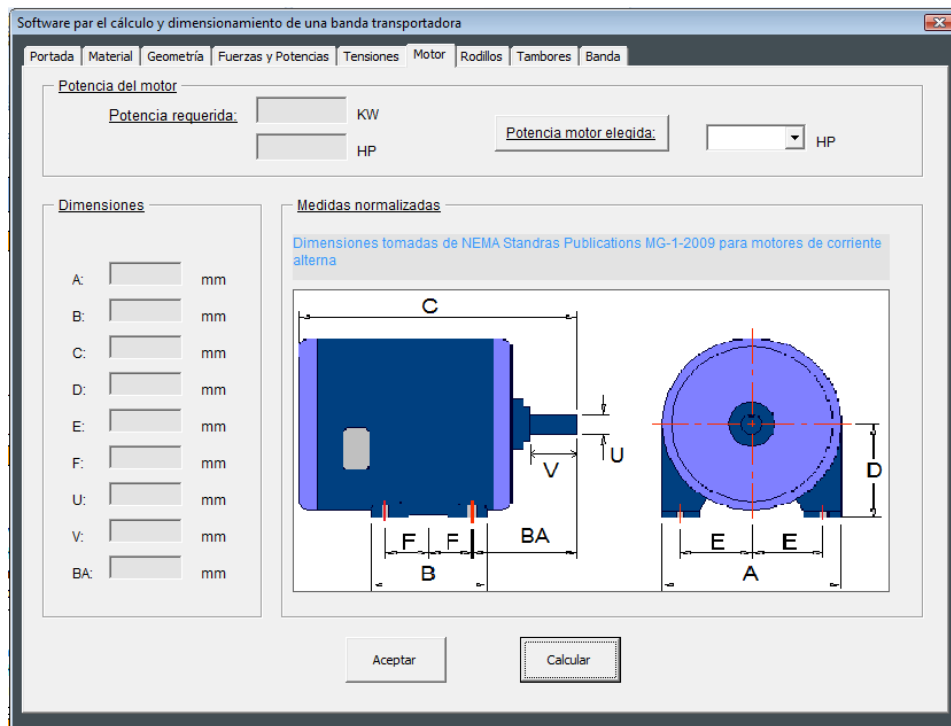
Tensión 3 de retorno: N Tensión trabajo unitaria: N/mm

Diagrama de la cinta transportadora con tensiones T1, T2, T3, T4, Ta, Tcp.

Aceptar 2° Calcular 2°

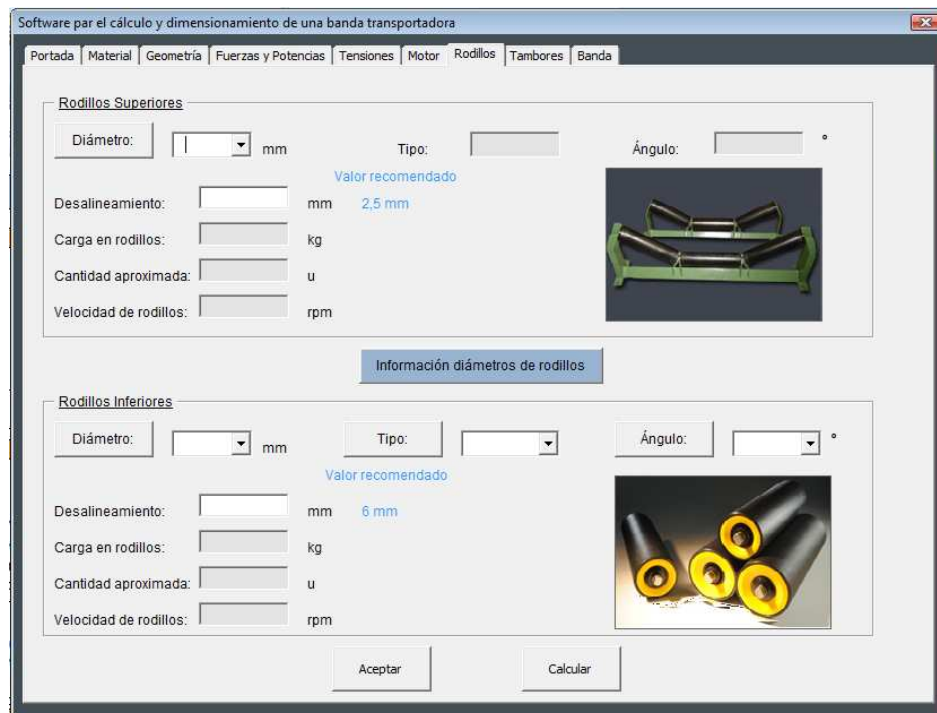
**Figura 46.** 5ª pestaña del software: Tensiones.

- La sexta ventana (Figura 47) muestra las características del motor de la instalación, teniendo el usuario que ingresar un valor para la potencia del motor conociendo la mínima requerida por el sistema.



**Figura 47.** 6ª pestaña del software: Motor.

- La séptima interfaz se dedica al cálculo de características asociadas a los rodillos superiores e inferiores (Figura 48).



**Figura 48.** 7ª pestaña del software: Rodillos.

En esta pestaña el usuario debe introducir el tipo y ángulo de los rodillos, desalineamiento y diámetro de los mismos. Podrá abrir una ventana adicional de información (Figura 49) en la que se muestran valores de diámetros de rodillos normalizados y recomendados.

Diámetros de rodillos que cumplen normas DIN, ISO, UNE y FEM		
63,5/ 89/ 102/ 108/ 127/ 133/ 152/ 159/ 177/ 193		
Referencia según fabricante Kauman		
Diámetros recomendados		
Clase de servicio	Diámetro rodillo (mm)	Ancho banda (mm)
Ligero	102-127	300-1000
	102-127	1000-1600
Medio	102-127	300-1000
	127-152	1000-1400
Pesado	127-159	1400-1800
	152-159	800-1400
	177-193	1400-2200
Referencia según catálogo 1040R Rexnord Belt Conveyors		

**Figura 49.** Diámetros de rodillos normalizados y recomendados.

- La octava ventana se dedica a los tambores de la instalación (Figura 50).

Software para el cálculo y dimensionamiento de una banda transportadora

Portada | Material | Geometría | Fuerzas y Potencias | Tensiones | Motor | Rodillos | Tambores | Banda

**Diámetros de tambores normalizados en función de la tensión de trabajo**  
**DRUM PULLEYS by DODGE**

Tensión unitaria trabajo Tu:  N/mm

Tensión en el lado flojo T2:  N/mm

Diámetro del tambor motriz (entrando en tabla con Tu):  mm

Diámetro del tambor de cola (entrando en tabla con T2):  mm

Diámetros normalizados s/DIN 22101

Arco de contacto (°)	Diámetro del tambor (mm)															
	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1400	1600	1800	2000	2200		
30	8	10	11	18	25	31	40	61	71	81	91	101	111	121		
40	6	8	10	15	21	26	35	52	61	69	78	87	95	104		
50	5	7	8	12	18	23	30	45	53	60	68	76	83	91		
60	5	7	8	12	18	22	29	44	51	58	66	73	80	88		
70	5	7	9	13	18	23	31	46	53	61	69	77	84	92		
80	6	8	9	14	20	25	33	50	58	66	75	83	91	100		
90	6	8	10	15	21	26	35	53	62	71	80	89	98	107		
100	7	9	11	16	23	28	38	57	67	75	85	94	103	112		
110	8	10	11	17	24	30	41	62	73	82	92	101	110	119		
120	8	10	11	18	25	32	43	64	75	86	96	107	118	128		
130	9	11	13	20	28	35	46	70	82	94	105	117	129	140		
140	10	12	14	22	32	39	53	79	92	105	118	131	144	157		
150	11	13	16	25	35	44	59	89	103	118	132	147	161	175		
160	12	15	18	28	39	49	66	98	114	131	147	164	180	196		
170	13	17	20	31	44	54	73	109	127	146	163	182	200	218		
180	15	18	22	34	48	61	81	121	141	161	182	202	222	243		
190	13	17	20	31	44	54	73	109	127	146	163	182	200	218		
200	12	15	18	28	39	49	66	98	114	131	147	164	180	196		
210	11	13	16	25	35	44	59	89	103	118	132	147	161	175		
220	10	12	14	22	32	39	53	79	92	105	118	131	144	157		
230	9	11	13	20	28	35	46	70	82	94	105	117	129	140		
240	8	10	11	18	25	32	43	64	75	86	96	107	118	128		

Distancia entre apoyos

Ancho de banda (mm)	Distancia entre apoyos (mm)
300	760
400	810
500	1020
600	1170
650	1370
800	1520
1000	1680
1200	1830
1400	1980
1600	2130
1800	2400
2000	2700
2200	3000

Ancho de banda:  mm

Ancho de cara de los tambores:  mm

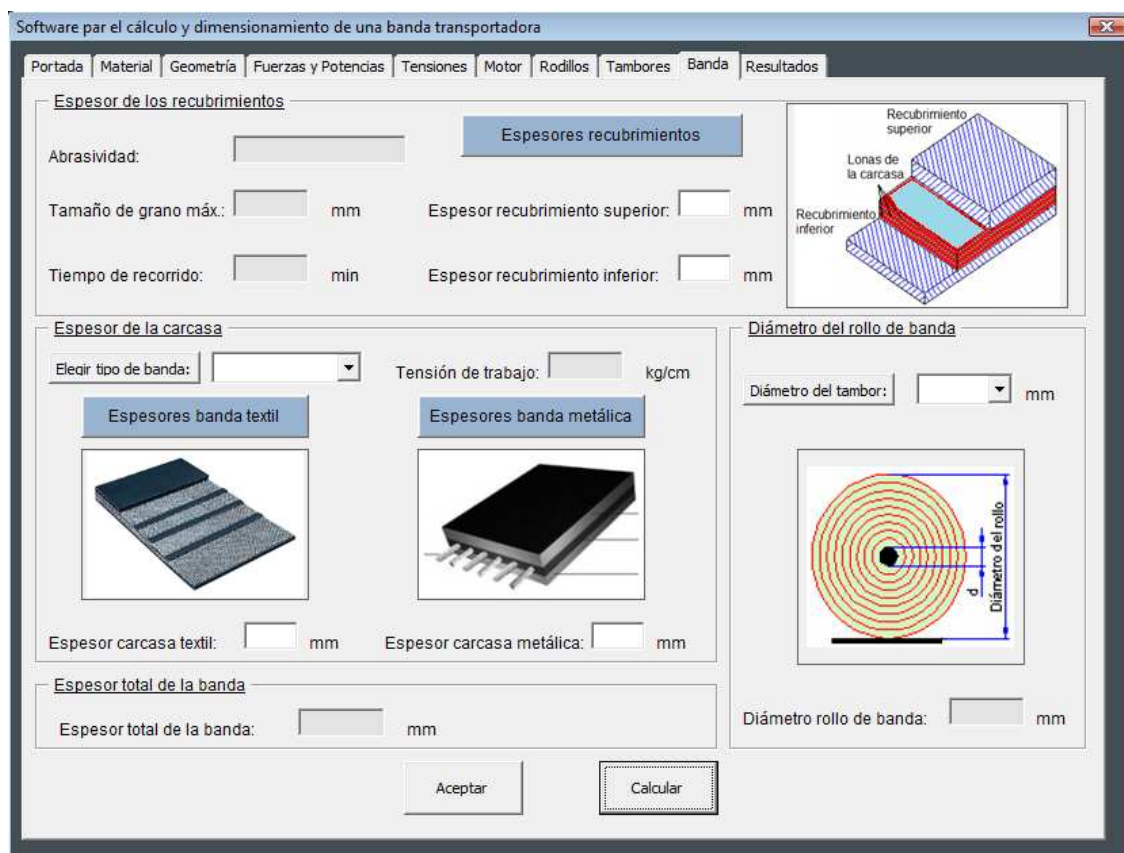
D en el tambor motriz y de cola:  mm

Aceptar

**Figura 50.** 8ª pestaña del software: Tambores.

En esta ventana el usuario debe introducir los valores que se muestran a continuación:

- Diámetro del tambor motriz.
- Diámetro del tambor de cola.
- Distancia entre apoyos en el eje de los tambores.
- La novena pestaña muestra las características asociadas a la banda que pueden verse en la Figura 51.



**Figura 51.** 9ª pestaña del software: Banda.

En este caso, los valores a introducir por el usuario serán:

- Espesor de los recubrimientos superior e inferior.
- Tipo de material de la banda.
- Espesor de la carcasa de la banda.
- Diámetro del tambor de rollo de banda.

Como en casos anteriores, en esta pestaña el usuario puede abrir ventanas con información adicional. De este modo, la Figura 52 muestra los espesores recomendados para los recubrimientos de la banda.


Esposores de los recubrimientos de la banda

Esposores de los recubrimientos superior e inferior de la banda

Espesor recubrimiento superior (mm)									
Grado de abrasividad	A			B			C		
Tamaño de grano	0-50	50-150	>150	0-50	50-150	>150	0-50	50-150	>150
Tiempo recorrido (min)									
<0,2	5-6	6-8	8-10	3-5	5-6	6-8	2-3	3-4	4-6
0,2-0,4	4-5	5-6	6-8	3-4,5	>=5	>=6	2-2,5	2,5-4	4-5
0,4-1	4-5	>=6	>=8	3-4	4-5	5-6	2-2,5	2,5-3,5	3,5-4
1-5	3-5	5-6	7-8	3-5	4-5	5-6	2-2,5	2,5-3,5	3,5-4
>5	3-5	5-6	7-8	3-5	4-5	5-6	2-2,5	2,5-3,5	3,5-4

Espesor superior (mm)	Espesor inferior (mm)
2-3	1,5
4-5	2
6	1,5-3
8-10	2-3




**Figura 52.** Espesores de recubrimientos de banda recomendados.

De manera análoga, la Figura 53 muestra la ventana con los espesores recomendados de carcasa para bandas textiles de tipo EP.

Esposor de la carcasa en bandas textiles

Esposores recomendados de carcasa para bandas textiles

Bandas textiles EP			
Denominación	Tensión de trabajo	Nº de lonas	Esposor total carcasa (mm)
EP 315/2	32	2	2,5
EP 400/3	40	3	3,8
EP 500/3	50	3	3,8
EP 500/4	50	4	4,9
EP 630/3	63	3	3,8
EP 630/4	63	4	4,9
EP 800/4	80	4	4,9
EP 800/5	80	5	6,1
EP 1000/4	100	4	4,9
EP 1000/5	100	5	6,1
EP 1250/4	125	4	4,9
EP 1250/5	125	5	6,1
EP 1600/4	160	4	4,9
EP 1600/5	160	5	6,1
EP 2000/5	200	5	6,1
EP 2500/5	250	5	6,1




**Figura 53.** Espesores de carcasa recomendados para bandas textiles tipo EP.

Por último, el usuario también puede abrir otra ventana adicional con información acerca de los espesores de carcasa recomendados para bandas tipo ST con refuerzo metálico.

Espeador de la carcasa en bandas metálicas

[Espesores de carcasa recomendados para bandas metálicas](#)

Bandas metálicas ST		
Denominación	Tensión de trabajo	Diametro máx. cordón (mm)
St 1000	100	4,1
St 1250	125	4,9
St 1600	160	5,6
St 2000	200	5,6
St 2500	250	7,2
St 3150	315	8,1
St 3500	350	8,6
St 4000	400	8,9
St 4500	450	9,7
St 5000	500	10,9
St 5400	540	11,3

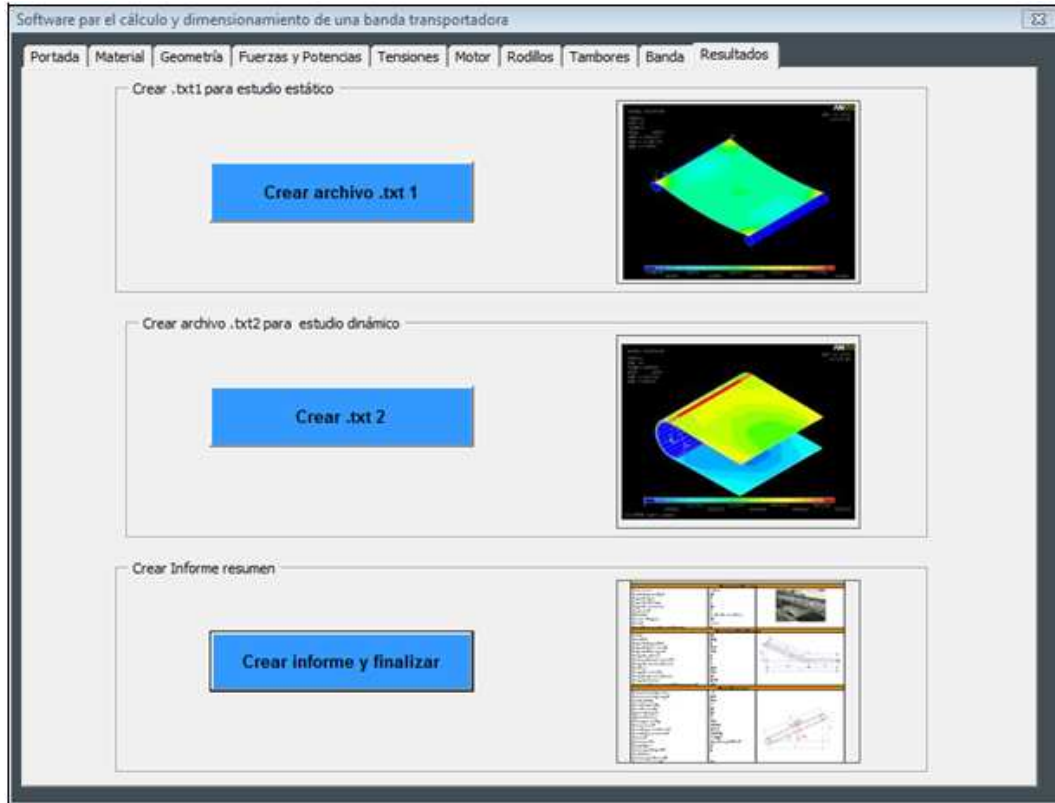


**Figura 54.** Espesores de carcasa recomendados para bandas tipo ST.

- En la décima y última interfaz, la de Resultados, se muestran tres botones que pueden verse en la Figura 55 y que se comentan a continuación:
  - 1er. Botón: Destinado a la creación del archivo con extensión .txt que posteriormente será implementado en ANSYS para llevar a cabo el estudio estático de la banda.
  - 2º Botón: Tiene la misma función que el botón anterior pero en esta ocasión el archivo de texto será el que se utilizará para realizar el estudio dinámico de la banda.



- 3er. Botón: Sirve para elaborar y mostrar en pantalla un informe final donde quedarán recogidos y resumidos todos los datos calculados en las pestañas anteriores del programa.



**Figura 55.** 10ª pestaña del software: Resultados.

### 5.2.2. Características principales y modo de utilización del programa

El entorno gráfico del programa hace que sea de fácil manejo, no obstante el usuario deberá tener en cuenta las siguientes indicaciones:

- Todas las interfaces siguen el mismo patrón: ingreso de datos en las casillas con fondo blanco, confirmación de datos pulsando el botón “aceptar”, cálculo de datos en casillas con fondo gris y presentación de resultados al pulsar el botón “calcular”. Una vez realizados estos dos pasos básicos, se pasará a la siguiente ventana o sección.

- El usuario deberá seguir un orden lógico avanzando desde la primera interfaz situada más a la izquierda, la correspondiente a la portada, hasta la última de la derecha, la dedicada a los resultados. Una vez situado en esta última pestaña y cuando considere que ha terminado el proceso de diseño de la banda, pulsará los dos primeros botones mediante los que se crearan los archivos con extensión .txt necesarios para los posteriores estudios estático y dinámico mediante el programa de elementos finitos ANSYS, así como un tercer botón que creará un informe resumen con todos los parámetros y características de la banda calculada.
- Cada fase de diseño tiene elementos de uso conocidos en diversas aplicaciones para Windows y que han sido explicados detalladamente en el capítulo anterior, como por ejemplo, cuadros de texto, cuadros de selección múltiple, botones de orden, botones de opción, cuadros de dialogo, etc. El usuario debe estar familiarizado con el uso de estos controles para ejecutar correctamente el programa y obtener los resultados adecuados.
- El programa está diseñado para guiar al usuario durante el proceso de cálculo de la banda de manera que ingrese los parámetros requeridos de forma adecuada, por ejemplo, si el usuario no ingresa un valor en una de las casillas donde debe hacerlo, es decir, en las que tienen el fondo blanco, se mostrará un mensaje de error. De igual forma, si el usuario intenta ingresar un valor en una de las casillas con fondo gris, comprobará que no puede hacerlo al estar bloqueadas contra escritura.

### **5.2.3. Macros programadas**

Como se comento anteriormente, para la programación del software se han utilizado conjuntos de instrucciones denominadas macros. De esta forma, a continuación se van a explicar las macros más importantes que han sido utilizadas.



### Macro para mostrar el programa en pantalla al ejecutar el archivo Excel

La siguiente macro carga y muestra el programa al ejecutar el archivo .xls. De esta forma, se eliminan los pasos necesarios que debería realizar el usuario en Microsoft Excel para acceder al editor de Visual Basic y lanzar el programa. A continuación puede verse el código programado.

```
Private Sub Workbook_Open()
Application.Visible = False
Proyecto.Show
End Sub
```

### Macro para volcar valores desde una interfaz del Userform a una hoja Excel

En todas las interfaces existe un botón “aceptar” que el usuario debe pulsar para volcar a una hoja Excel los datos introducidos. Los valores serán copiados en la primera fila vacía que exista en la hoja de cálculo predefinida en cada macro.

A continuación se muestra un ejemplo de la macro programada en la interfaz destinada a la elección del material.

```
Private Sub UFAceptar1_Click()
'Definición de las variables
Dim iFila As Long
Dim ws As Worksheet
Set ws = Worksheets(1)
'Encuentra la siguiente fila vacia
iFila = ws.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Offset(1, 0).Row
'Copia los datos a la tabla Excel en la posición i de la fila vacia
ws.Cells(iFila, 1).Value = Me.CM1.Value
End Sub
```

### Macro para volcar valores desde una hoja Excel a una interfaz del Userform

Mediante esta macro, los datos calculados en una hoja Excel serán volcados a la interfaz correspondiente. Esta acción se ejecuta cuando el usuario pulsa el botón “calcular”. A continuación se puede ver un ejemplo de esta macro utilizada en el cálculo de las fuerzas y potencias requeridas en la banda.

```
'Calcular valores
Private Sub Calcular3_Click()
CF2.Text = Worksheets("Banda").Range("M3").Value
End Sub
```

### Macro para añadir valores a un ComboBox

Este tipo de macro es utilizada para introducir valores a un ComboBox. A continuación se puede ver un ejemplo correspondiente al tipo de geometría de los rodillos superiores.

```
'Añadir valores al ComboBox banda1
Sub banda1_Click()
CB13.AddItem "planos"
CB13.AddItem "bina"
CB13.AddItem "terna"
End Sub
```

### Macro para comprobar que se ingresa un dato en un TextBox

Mediante el siguiente código, el programa verifica que el usuario ha introducido algún dato en la casilla en la que se requiere, mostrando un mensaje de error en caso contrario. Seguidamente puede verse un ejemplo.

```
'Verificar que se ingresa un dato en CB3
If Trim(Me.CB3.Value) = "" Then
Me.CB3.SetFocus
MsgBox "Debe ingresar un valor"
Exit Sub
End If
```

### Macro para cargar y mostrar un UseForm

Este tipo de macro se utiliza para cargar y visualizar en pantalla un UseForm determinado. Puede verse un ejemplo a continuación.

```
'Abrir UseForm de información de espaciamiento de rodillos
Private Sub CommandButton4_Click()
Load espaciamientorodillos
espaciamientorodillos.Show
End Sub
```

### Macro para crear un archivo de texto .txt a partir de una hoja Excel

Para poder crear los archivos de texto que después serán utilizados en ANSYS, se ha programado una macro que genera dichos archivos a partir de dos de las pestañas del libro excel. El siguiente código genera en el escritorio un archivo de texto llamado archivo estático de forma que en cada una de las filas de dicho archivo aparecerán los valores de cada una de las celdas descritas en el campo Range de cada línea programada dentro de la macro. Para elegir la hoja de cálculo desde la que se copiarán los valores al archivo de texto, se utiliza la palabra clave Sheets.

```
Private Sub txt1_Click()
Sheets("txt1").Select
Dim namefile As String
namefile = "C:\Users\pablo\Desktop\Archivo ESTATICO.txt"
Open namefile For Output As #1
Print #1, Range("A1")
Print #1, Range("A2")
.
.
.
Print #1, Range("A192")
Print #1, Range("A193") & Range("B193")
```

De forma análoga, se ha programado otra macro para crear en el escritorio un segundo archivo de texto que será utilizado posteriormente para el estudio dinámico de la banda en ANSYS.

#### Macro para mostrar la hoja de Informe y cerrar el programa

Mediante este código se consigue que cuando el usuario pinche sobre el botón de “Crear informe y finalizar”, se cargue y muestre la hoja excel de informe que contiene un resumen con todos los parámetros calculados con el software y se cierre el programa de diseño de la banda transportadora. A continuación puede verse la programación de dicha macro.

```
' Hace que se abra la hoja de informe y cierre el programa
Private Sub informe_Click()
Worksheets("Informe").Select
Application.Visible = True
Proyecto.Hide
End Sub
```

# CAPITULO 6

## SIMULACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE LOS MODELOS

### 6.1. SIMULACIÓN CON ANSYS

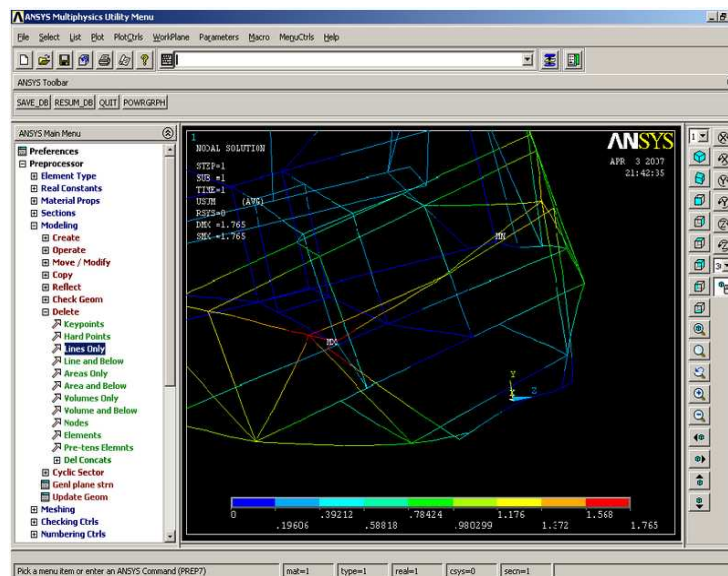
#### 6.1.1. Introducción a ANSYS

ANSYS, Inc. (Figura 56) fue fundada en 1970 (*Swanson Analysis Systems, Inc.*) con aproximadamente 1700 empleados, la mayoría con experiencia en elementos finitos y dinámica de fluido computacional.



**Figura 56.** ANSYS, Inc.

ANSYS desarrolla, gestiona y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará un determinado elemento bajo un entorno real. ANSYS es un software de simulación ingenieril (Figura 57) y está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.



**Figura 57.** Interface de ANSYS, Inc.

Entre las muchas aplicaciones reales de ANSYS puede destacarse, por su repercusión, el hecho de que, en 2008, el *National Institute of Standards and Technology* de Estados Unidos utilizó ANSYS para recrear los acontecimientos sucedidos en el desplome del *World Trade Center* durante los atentados del 11 de Septiembre de 2001.

ANSYS, como la gran mayoría de los programas de MEF, consta de tres herramientas principales llamadas módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Este procesador de elementos finitos para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no lineales), análisis de transferencia de calor y fluidodinámica, así como problemas de acústica y electromagnetismo. Normalmente se lleva a cabo una utilización simultánea de estas herramientas logrando combinar

problemas de estructuras junto con otros de transferencia de calor. Este software es utilizado en ingeniería civil, electricidad, física y química.

Existen diferentes versiones dentro de la gama de productos de ANSYS que se detallan a continuación.

- **ANSYS:** Análisis estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos, electromagnetismo, campos acoplados.
- **ANSYS Workbench:** Análisis estructural, térmico, de fluidos y electromagnético bajo un entorno visual más amigable que el de ANSYS estándar.
- **ANSYS CFX:** Procesos con fluidos, flujos, transferencias de calor o reacciones químicas.
- **Soluciones ANSYS AUTODYN:** Software explícito para análisis de cargas extremas de corta duración.
- **Soluciones ANSYS de mallado:** ANSYS ICEM CFD/AI\*Environment es una herramienta para el pre-proceso y post-proceso.
- **CivilFEM con ANSYS:** Análisis estructural y aplicaciones de ingeniería civil.

A continuación se comentan las características principales de ANSYS.

- Integrado: ANSYS permite la asociación de distintas tecnologías para el desarrollo de un producto sin abandonar una única plataforma. Además, permite asociaciones con los software más avanzados de CAD, así como adaptarse sin dificultad a sistemas de documentación propios de cada empresa.
- Modular: Permite que los clientes instalen una única aplicación para la solución de un problema específico. A medida que el usuario avanza en la solución, este puede necesitar análisis más complejos. Los distintos módulos de ANSYS permiten solucionar los problemas por partes.

- Extensible: ANSYS propone "integración vertical", adaptaciones más específicas según las requiera el cliente. Estas adaptaciones pueden ir desde automatizaciones de procesos que realiza normalmente un cliente hasta aplicaciones más complejas que se adaptan a determinados sectores industriales.

Hay que tener en cuenta que la mayoría de los errores y problemas de ANSYS no se basan en el programa en concreto sino en el elemento finito utilizado para realizar los análisis [17]. A continuación se muestran algunas desventajas de ANSYS.

- La solución arrojada por el programa es una compleja mezcla de cálculos discretos mientras que los esfuerzos, temperaturas y otras propiedades se representan mediante parámetros continuos. De esta forma, los resultados calculados por ANSYS en algunas zonas del modelo son aproximaciones que dependerán del número de elementos utilizados.
- La geometría del objeto que se desee analizar puede generar errores en la solución debido a que si el mallado realizado no mantiene ciertos parámetros en rango, como son los ángulos de las aristas o las relaciones de tamaño en las aristas, el método puede fallar afectando a la convergencia del sistema.
- Diferentes decisiones del analista, como la densidad de la malla, influyen poderosamente en los resultados, que pueden sufrir grandes variaciones bajo hipótesis no demasiado diferentes.
- Debido a la utilización de un rango discreto en cuanto a las propiedades de la materia, se debe aumentar la cantidad de puntos en el mallado del objeto en los lugares en los que el gradiente de la propiedad analizada sea demasiado elevado, consiguiendo de esta forma resultados más precisos.
- El tipo de elemento, así como algunas propiedades, son introducidas de forma manual por el usuario, lo cual genera errores de tipo humano que en ocasiones el programa no reconoce, no existiendo de esta forma mensajes de alerta.

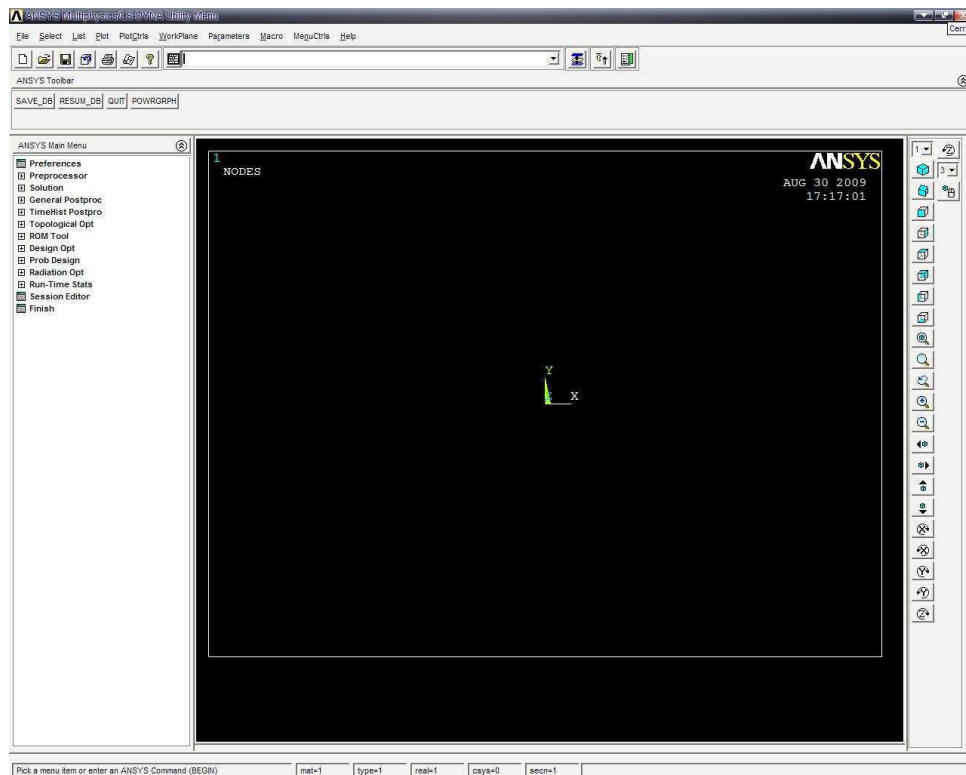


### 6.1.2. Interface gráfico del usuario

ANSYS se puede utilizar de dos modos diferentes:

- A través de un interface gráfico basado en ventanas en las que el usuario encuentra varios iconos que puede accionar a través del ratón. Esta forma de utilización es relativamente intuitiva y permite a usuarios no iniciados resolver problemas sencillos.
- Gracias a un sistema de comandos que permite al usuario introducir una línea de texto que ordena la ejecución de las acciones. Esta opción suele ser utilizada por usuarios más experimentados en el manejo de ANSYS.

La primera vez que se inicializa la aplicación ANSYS, el usuario se encuentra con dos pantallas, mostradas en la Figura 58 y Figura 59.



**Figura 58.** Interface de usuario de ANSYS.

Desde la ventana anterior se puede acceder a las distintas secciones de la aplicación:

- **Utility menu**

Este menú contiene las funciones de tipo más generales que se pueden utilizar a lo largo de toda la sesión de ANSYS. Entre ellas se pueden destacar:

- *File*: se utiliza para el control de archivos.
- *Select*: se emplea para seleccionar los componentes deseados del modelo en función de sus propiedades, o mediante el ratón, etc.
- *List*: se encarga de generar listas de componentes, partes, elementos en función de propiedades, etc.
- *Plot*: a partir de este menú se puede seleccionar los tipos de elementos que se quieren visualizar por pantalla, como por ejemplo, mostrar áreas, elementos, volúmenes, nudos, etc.
- *Plot Controls*: desde este desplegable se controlan las opciones de visualización, opciones como las numeraciones, los colores, etc.
- *Workplane*: a través de este menú se puede modificar la situación del plano de trabajo, algo que puede resultar fundamental en ciertos modelos.

- **Main Menu**

Esta sección contiene las funciones principales de ANSYS, a través de las cuales se va a construir el modelo, aplicar condiciones de contorno, elegir el tipo de ensayo, etc. Este menú contiene el preproceso, solución y postproceso, entre otros. Las características y opciones de estas aplicaciones se analizarán en sucesivos apartados.

- **Toolbar**

Es una zona que contiene botones con comandos y funciones básicas del programa. Esta barra de herramientas se puede personalizar de forma que se tenga acceso directo a las funciones que desee el usuario.


- **Input Window**

Se encuentra formada por una línea de escritura a través de la cual se pueden introducir comandos. El uso de esta herramienta agiliza el proceso de construcción de los modelos pero únicamente está recomendada para usuarios expertos en ANSYS, ya que se hace necesario conocer las funciones a introducir, mientras que trabajar desde el *main menu* es mucho más intuitivo.

- **Graphics window**

Tal y como su nombre indica, se trata de la zona de la pantalla principal en la que se visualiza tanto el modelo como los resultados obtenidos tras el análisis. Dentro de esta misma sección, también se pueden localizar una serie de botones que permiten al usuario modificar las perspectivas de visualización, ángulos, zoom, etc.

La segunda ventana que aparece al inicializar la aplicación se denomina *Output Window* y en ella se muestra el texto de ejecución del programa (Figura 59).



```

ANSYS 11.0 Output Window
ANSYS Multiphysics/LS-DYNA

***** ANSYS COMMAND LINE ARGUMENTS *****
INITIAL JOBNAME      = file

START-UP FILE MODE   = READ
STOP FILE MODE       = READ
GRAPHICS DEVICE REQUESTED = win32
GRAPHICAL ENTRY      = YES
LANGUAGE             = en-us
INITIAL DIRECTORY    = C:\Documents and Settings\Administrador\MAKINA

00338873 VERSION=INTEL NT      RELEASE= 11.0  UP200701
CURRENT JOBNAME=file 17:08:33 AUG 30, 2009 CP= 0.688

/SHOW SET WITH DRIVER NAME= WIN32 , RASTER MODE, GRAPHIC PLANES
RUN SETUP PROCEDURE FROM FILE= C:\Archivos de programa\ANSYS Inc\v11\start110.ans
/INPUT FILE= menust.tmp LINE= 0
/INPUT FILE= C:\Archivos de programa\ANSYS Inc\v110\ANSYS\apdl\start
E= 0
ACTIVATING THE GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI). PLEASE WAIT...
CUTTING PLANE SET TO THE WORKING PLANE
PRODUCE NODAL PLOT IN DSYS= 0
TURN OFF WORKING PLANE DISPLAY
PRODUCE NODAL PLOT IN DSYS= 0
  
```

**Figura 59.** Ventana Output de ANSYS.

### 6.1.3. Pasos a seguir para la resolución de un problema

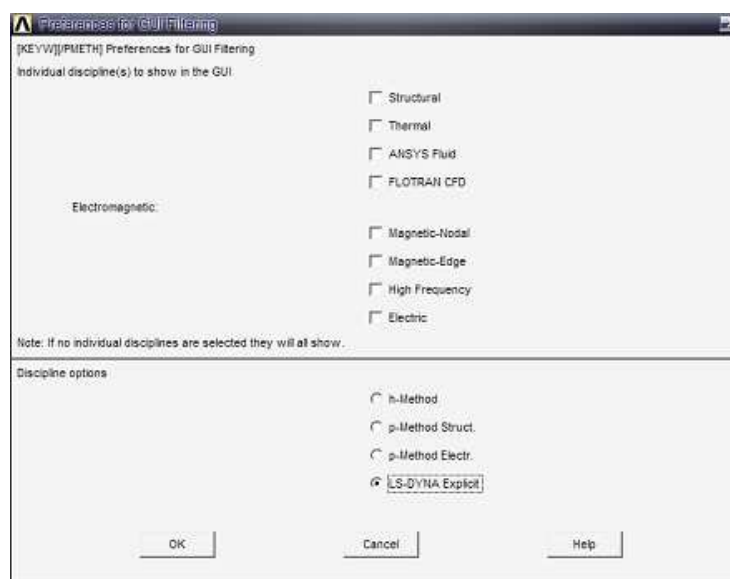
La resolución de un problema mediante ANSYS se organiza siempre de la misma manera, pasando secuencialmente por preproceso, proceso y postproceso. En el presente documento se ha utilizado el módulo *Multiphysics* de ANSYS para el modelo estático y ANSYS *Ls-Dyna* para el modelo dinámico. Las tres etapas principales del proceso se mantienen para ambos modelos, resultando únicamente diferentes algunos aspectos que se puntualizarán más adelante. Es por esto, que se va a explicar el proceso general para ANSYS *Ls-Dyna*, por ser este el más largo y completo.

#### 6.1.3.1. Preproceso

Esta sección es dónde se proporcionan los datos de diseño del modelo, tales como geometría, elementos, materiales, etc. Antes de comenzar con el modelado del problema, se debe elegir el entorno *Ls-Dyna*, para lo cual se deberá seguir la siguiente secuencia de comandos:

*Main Menu: Preprocessor → Preferences*

Al seleccionar estos comandos aparecerá el menú mostrado en la Figura 60. En dicho menú aparecen varias opciones, de manera que se tendrá que activar la opción *LS-DYNA Explicit*.



**Figura 60.** Cuadro de preferencias ANSYS.

Una vez seleccionada la opción *Ls-Dyna*, aparecerán en el *main menu*, junto con las opciones genéricas de ANSYS, las opciones propias del módulo *Ls-Dyna*. A partir de este momento se puede comenzar a realizar el diseño del modelo utilizando las opciones incluidas en el preproceso de ANSYS. Para la definición de cualquier problema siempre se deberá seguir la siguiente secuencia de operaciones.

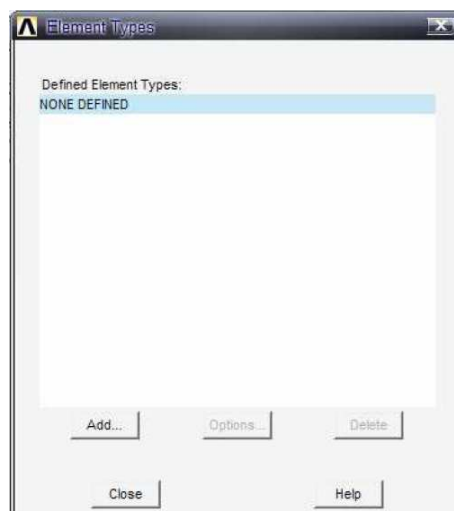
### **Definición de elementos**

En la introducción a ANSYS se ha hecho especial hincapié en la importancia de una elección acertada del tipo de elemento con el que se va a construir el modelo. ANSYS dispone de más de 150 variedades de elementos para la definición de los diferentes problemas. Al seleccionar un elemento se asumen una serie de propiedades características de dicho elemento pero además la mayoría de los elementos en ANSYS tienen otras opciones que deben ser definidas por el usuario en función del tipo de análisis. Estas opciones son conocidas en ANSYS como *keyoptions*.

Para poder seleccionar el tipo de elemento se debe seguir la siguiente secuencia de comandos en el *main menu*:

*Preprocessor* → *Element Type* → *Add / Edit / Delete*

Al pulsar este comando aparecerá una nueva ventana (Figura 61) en la que se recoge la siguiente información.



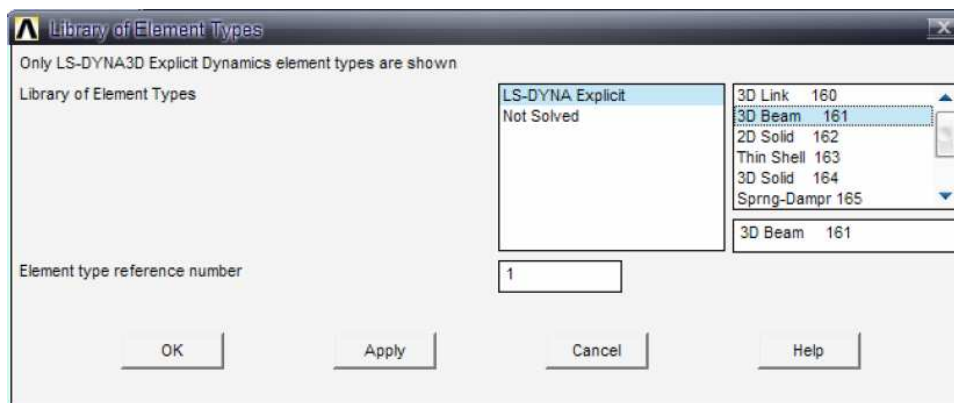
**Figura 61.** Cuadro de diálogo para elementos seleccionados.

- **Defined Element types**

En esta zona se mostrarán los elementos que hayan sido seleccionados.

- **Botones de acción**

- *Add*: al pulsar este botón se visualizará el listado de elementos disponibles (Figura 62). En primer lugar se deberá elegir el tipo de elemento deseado.



**Figura 62.** Cuadro de diálogo para la selección de elementos.

- *Options*: mediante esta pestaña se pueden seleccionar características adicionales al elemento. Esta opción no se encuentra disponible para todos los elementos.
- *Delete*: es un comando empleado para borrar un elemento seleccionado anteriormente.

### **Definición de las constantes reales de los elementos**

En este paso se procede a definir las propiedades específicas de cada uno de los elementos, como puede ser el espesor, los momentos de inercia, el tipo de sección, etc. En función del tipo de elemento se necesitará facilitar unas constantes reales u otras, aunque hay algunos elementos que no necesitan constantes reales, como por ejemplo el tipo *Solid 164*. Para definir las constantes reales se deben seleccionar los siguientes comandos situados en el *main menu*:

*Preprocesor* → *Real Constant*

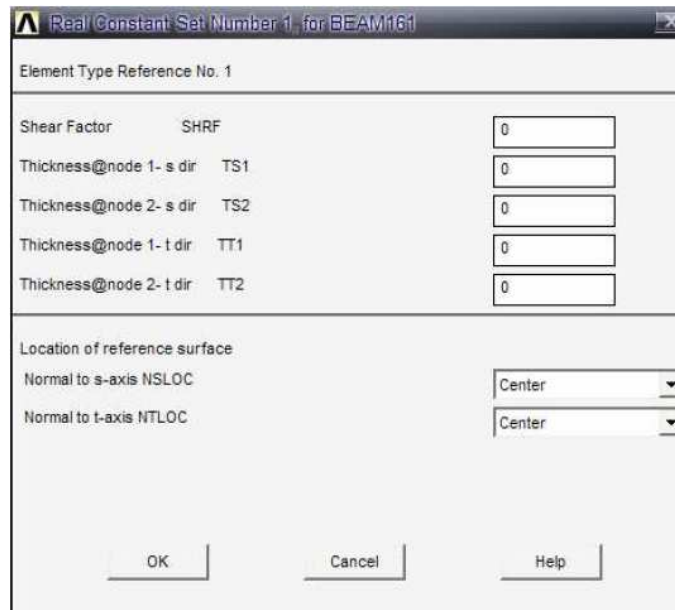
Tras esta elección se abrirá el cuadro de diálogo mostrado en la Figura 63.



**Figura 63.** Cuadro de diálogo de las constantes reales de cada elemento.

- **Botones de acción**

- *Defined Real Constant Sets*: aquí se mostrará la lista de constantes reales que ya han sido definidas.
- *Add*: mediante este comando se añadirá el elemento del que se quieren definir las constantes reales. Primero se elegirá uno de los elementos definidos anteriormente y posteriormente aparecerá el cuadro de diálogo mostrado en la Figura 64, en el cuál se definirán las constantes reales propias del elemento seleccionado.
- *Delete*: se emplea para eliminar las constantes reales ya definidas.
- *Edit*: se utiliza para modificar las constantes reales ya definidas.

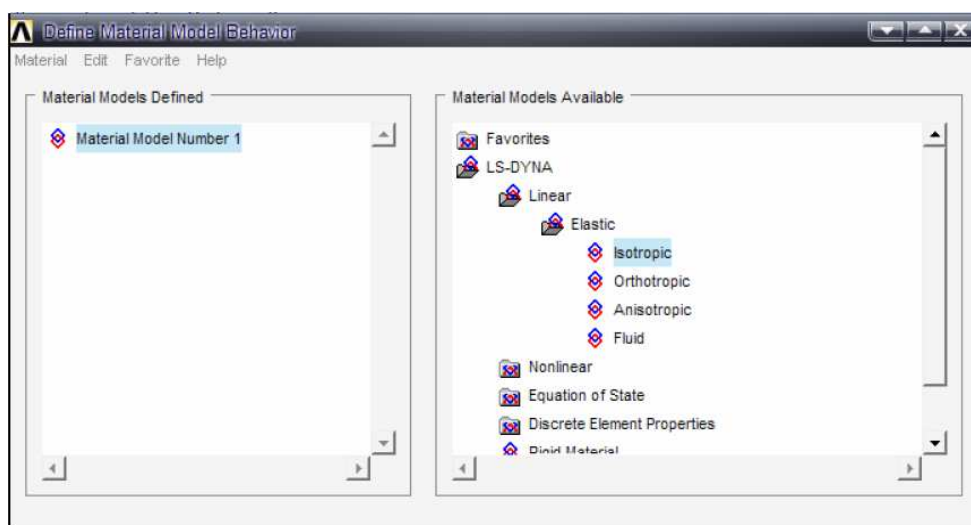


**Figura 64.** Cuadro de diálogo de las constantes reales del elemento BEAM 161.

### **Definición de materiales y propiedades**

Una vez definidos los elementos y sus constantes reales, el siguiente paso consiste en la elección de los materiales y la definición de las propiedades físicas de los mismos. En función del material que se seleccione se tendrán que definir unas propiedades u otras. La fijación del material y sus propiedades se efectúa seleccionando los siguientes comandos del *main menu* (Figura 65):

*Preproceso* → *Material Props* → *Material Models*

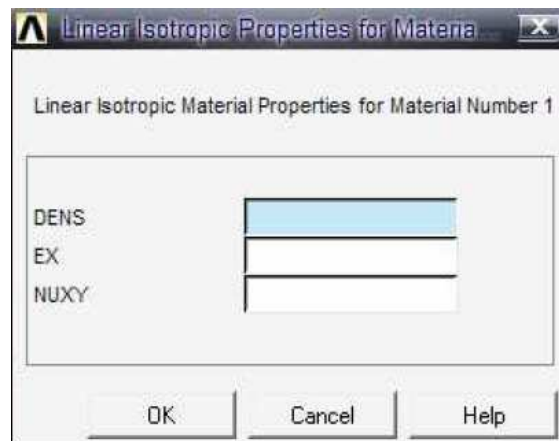


**Figura 65.** Cuadro de diálogo para materiales.



Como puede verse en la Figura 65, en el cuadro de dialogo de materiales existen dos ventanas o secciones.

- *Material Model Number*: en esta sección se mostrarán los materiales anteriormente seleccionados. Para añadir un nuevo material se ejecutará el comando *Material New* → *Model*.
- *Material Models Available*: en esta otra zona se encuentran los modelos de materiales disponibles. Al seleccionar uno de ellos se abrirá el cuadro de diálogo mostrado en la Figura 66, en el que se fijarán las propiedades del material seleccionado. En función del tipo de material será necesario definir unas propiedades u otras.



**Figura 66.** Cuadro de diálogo para propiedades de los materiales.

### **Creación de la geometría del modelo**

Para geometrías muy simples (elementos lineales como barras), un método para la creación del modelo es definir directamente los nudos de dicho modelo de forma manual.

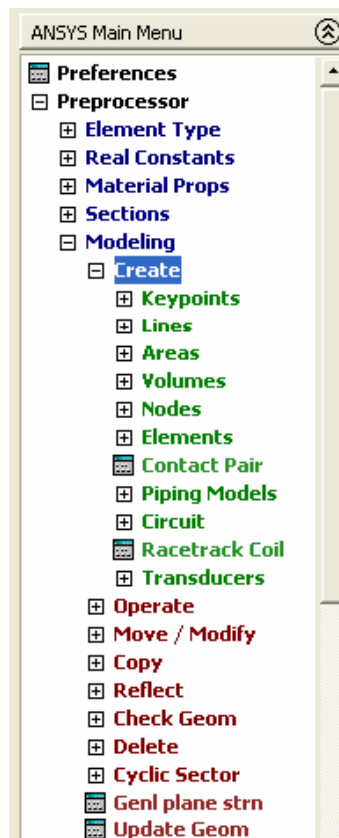
En el momento en el que la geometría se complica, es necesaria la creación de elementos geométricos simples (método de modelado de sólidos) como líneas, rectángulos, círculos, etc. Para combinar los distintos elementos creados se aplican operaciones booleanas tales como adición, sustracción e intersección. Una vez creado el

modelo, se definirá la forma y tamaño de malla y ANSYS generará automáticamente los nudos.

La creación de la geometría se lleva a cabo siguiendo la siguiente secuencia de comandos en el *main menu*:

*Preprocesor* → *Modeling* → *Create*

Al aplicar estos comandos se desplegará un submenú (Figura 67) en el que se encuentran los diferentes elementos que se pueden crear y entre los que se encuentran puntos, líneas o áreas. También existe la posibilidad de definir directamente nodos y elementos.



**Figura 67.** Menú para la creación del modelo.

A la hora de definir los diferentes elementos de un modelo es fundamental tener en cuenta la jerarquía de los diferentes elementos; los volúmenes se encuentran

formados por áreas, las áreas por líneas y las líneas por puntos (*keypoints*). Estos conceptos son fundamentales a la hora de llevar a cabo operaciones de edición y borrado de elementos. De esta forma, para borrar geometrías se dispone de dos opciones:

1. *Preprocesor* → *Delete* “... only”: con este comando se borra únicamente la geometría elegida, es decir, si se selecciona borrar línea, únicamente se borra la línea pero no los *keypoints* que la forman.
2. *Preprocesor* → *Delete* “... and below”: se eliminarán tanto el elemento seleccionado como aquellos que lo forman. De esta forma, si se selecciona eliminar una línea se borrará tanto la línea como los puntos que la forman.

Para la creación de un modelo no sólo es necesario conocer los comandos de creación de los distintos elementos, sino que es fundamental conocer otras características de ANSYS.

- ANSYS únicamente permite la visualización de un tipo de elementos. De este modo, si se selecciona visualizar áreas no se mostrará el resto de elementos como líneas o puntos. La opción de visualización se configura mediante la siguiente secuencia de comandos:

*Utility Menu* → *Plot* → *Keypoints (lines, areas, etc)*.

- ANSYS dispone de una herramienta que permite al usuario la selección de objetos determinados del modelo. Esta función se abre al seleccionar la siguiente secuencia de instrucciones:

*Utility* → *Menu* → *Select* → *Entities*

En este cuadro de diálogo (Figura 68), en primer lugar se elige el tipo de elemento que se quiere visualizar (nudo, área, volumen...) y a continuación se define la restricción que se le quiere aplicar para diferenciar los elementos (tipo de material,

número de constante real...). Por último se pueden utilizar otras opciones como definir si se quiere mostrar únicamente los elementos seleccionados, o si se quieren ocultar, etc.



**Figura 68.** Cuadro de diálogo para la selección de objetos.

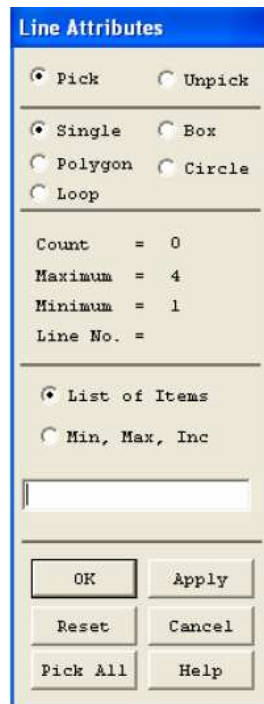
### **Definición y mallado del modelo**

Tras la generación de la geometría, el siguiente paso consiste en dividir los objetos en nudos y elementos. Este proceso se denomina mallado (*meshing*).

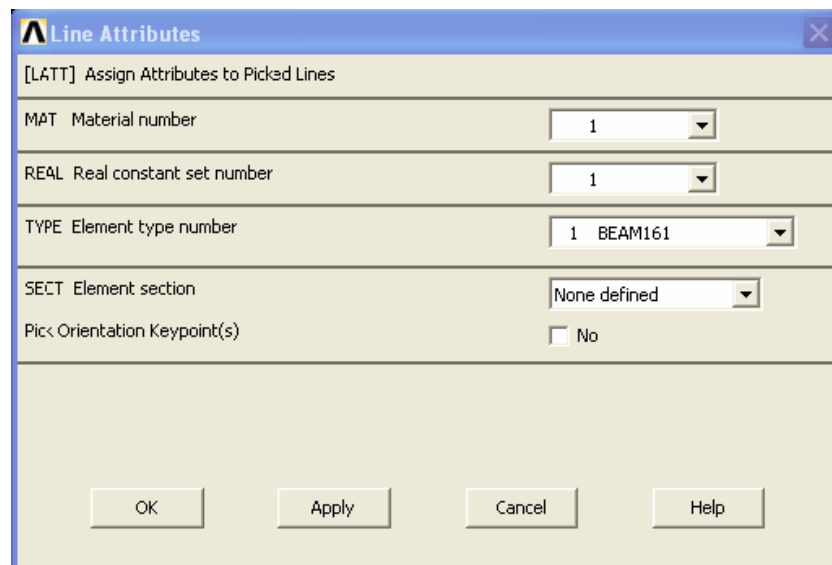
En primer lugar, se tienen que definir las propiedades de los diferentes elementos que se desean mallar. Dentro de estas características se encuentran el tipo de elemento, la constante real y las propiedades del material. Esto se realiza siguiendo la siguiente secuencia de comandos:

*Preprocesor → Meshing → Mesh Attributes → Picked KPs (lines, areas...)*

Tras seguir esta secuencia aparecerá un cuadro de diálogo (Figura 69), mediante el cual se seleccionarán los elementos de los que se desea fijar sus características. Una vez seleccionados se pulsa *ok* y se abrirá un nuevo cuadro de diálogo (Figura 70) en el que se podrán definir las características anteriormente mencionadas de los elementos seleccionados.



**Figura 69.** Cuadro de diálogo para la selección de elementos.



**Figura 70.** Cuadro de diálogo para definir características de elementos.

Si se desea fijar o variar el tamaño de mallado, se deberá seguir la siguiente secuencia de comandos:

*Preprocesor → Meshing → Size Cntrls → Manual Size → Global Size (areas, lines...)*

Tras aplicar este código se visualizará otra ventana (Figura 71) en la que se podrá definir el tamaño de malla o el número de divisiones del elemento. La selección de cualquiera de las opciones se hará en función de las necesidades del usuario.



**Figura 71.** Ventana para seleccionar el tamaño de mallado.

Una vez definidas las propiedades de los elementos a mallar, el siguiente paso consiste en el proceso de mallado propiamente dicho. Para iniciar el mallado se deberá aplicar el siguiente código en el *main menu*:

*Preprocesor* → *Meshing* → *Mesh* → *KPs (lines, areas...)*

Al ejecutar este comando aparecerá un cuadro de diálogo, similar al comentado anteriormente (Figura 69), que permitirá la selección de los elementos que se desean mallar. Una vez seleccionados todos los elementos que se quieren mallar, para ejecutar la orden se pulsará el botón *ok* o *apply*.

### 6.1.3.2. Solución

Después de finalizar la construcción del modelo, el siguiente paso consiste en fijar las condiciones de ensayo (condiciones de contorno, cargas, velocidades, etc). Todas estas operaciones se pueden efectuar desde el menú *solution*, situado en el *main menu*.

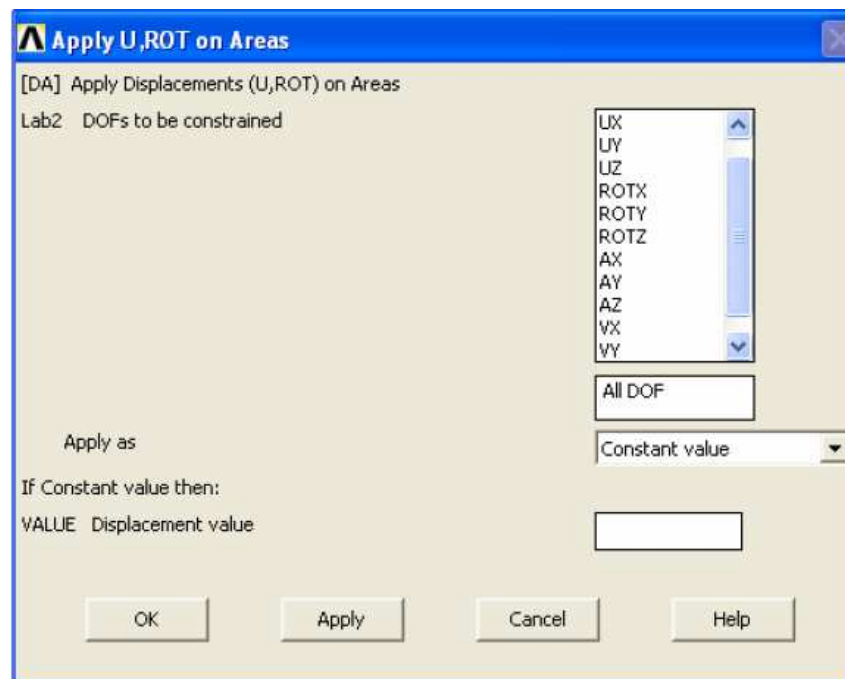
A continuación se van a exponer las distintas condiciones que se pueden definir para la simulación.

### Aplicación de restricciones (*Constrains*)

En muchos de los problemas a resolver, una condición de contorno típica es la fijación del desplazamiento o giro, en alguna de las direcciones del espacio. Esta restricción no fija necesariamente un desplazamiento como nulo, sino que también se puede definir un desplazamiento máximo de alguno de los componentes. La secuencia de comandos que hay que seguir en el *main menu* será:

*Solution* → *Constrains* → *Apply* → *On lines (areas, nodes...)*

Tras aplicar este código aparecerá un cuadro de diálogo para la elección de los elementos (áreas, nodos, líneas...) sobre los que se quiere aplicar la restricción. Una vez se hayan seleccionado y confirmado pulsando *ok*, aparecerá un nuevo cuadro de diálogo (Figura 72. **Cuadro de diálogo de restricción de movimientos.**Figura 72) mediante el cual se fijarán los desplazamientos o rotaciones cuyo valor se quiere delimitar (*UZ*, *UK*, *UX*, *WY*, *WZ* o *All DOF*).



**Figura 72.** Cuadro de diálogo de restricción de movimientos.

### **Fijación de la velocidad inicial**

Otra condición que se suele aplicar al modelo es la velocidad inicial del mismo o de alguno de sus componentes. Esta velocidad inicial se podrá definir como lineal o angular y se podrá aplicar sobre puntos, líneas, áreas o volúmenes. La secuencia a seguir se muestra a continuación:

*Main menu: Solution → Initial Velocity → On Nodes (lines, areas, ...)*

El menú que se muestra en la Figura 73 se utiliza para la fijación de las velocidades iniciales. En la zona definida como *generate velocity on component* se tendrá que seleccionar el componente sobre el que se va a definir la velocidad mientras que en los recuadros situados inmediatamente debajo se definirá el valor de las velocidades.

**Input Velocity**  
[EDGE] Initial Velocity

Input velocity on component: None defined  
or node (if node number chosen):

Translational Velocity:

VX Global X-component:   
 VY Global Y-component:   
 VZ Global Z-component:

Angular Velocity (rad/sec):

OMEGAX Global X-component:   
 OMEGAY Global Y-component:   
 OMEGAZ Global Z-component:

OK Apply Cancel Help

**Figura 73.** Cuadro de diálogo de velocidades iniciales.

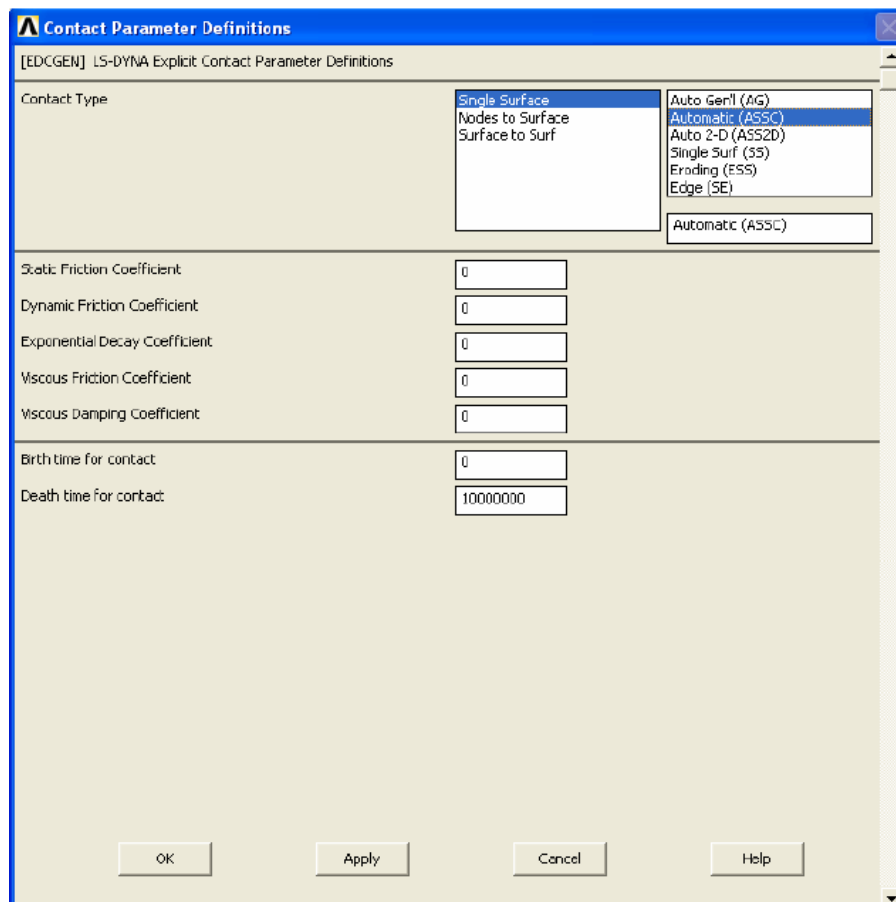


## **Contacto entre componentes**

En los modelos en los que exista algún tipo de contacto entre partes o zonas, se tendrá que aplicar unas condiciones de contacto para definir la interacción entre ellas. Los contactos se definirán mediante la siguiente secuencia de comandos:

*Main menu: Preprocesor → LS – Dyna Options → Contact → Define Contact*

Tras aplicar estos comandos aparece el cuadro de diálogo mostrado en la Figura 74. En esta ventana se pueden definir distintos tipos de contacto, los cuales se elegirán en función del tipo de problema que se tenga.



**Figura 74.** Cuadro de diálogo de definición de parámetros de contacto.

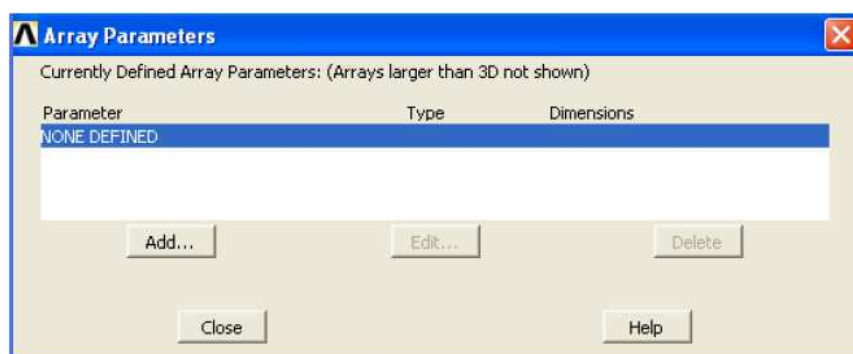
## **Cargas (Loads)**

Otra condición fundamental para la definición de problemas en ingeniería consiste en la aplicación de cargas en el modelo.

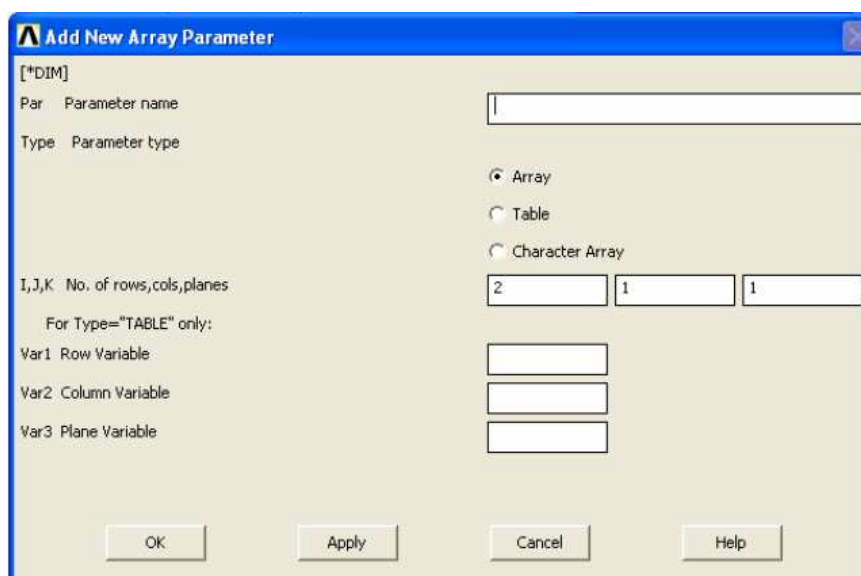
Las cargas se definen mediante vectores de parámetros aplicando la siguiente secuencia de comandos:

*Utility menu: Parameters → Array Parameters → Define/Edit*

En el menú (Figura 75) se mostrarán los *arrays* creados, de forma que mediante el botón *Add* se podrán añadir nuevas cargas definidas como vectores gracias a la ventana que se muestra en la Figura 76. Un dato fundamental a la hora de definir las cargas es tener en cuenta que ANSYS aplica las cargas durante un determinado tiempo, de forma que habrá que construir un vector de parámetros adicional en el que se defina el tiempo durante el cual se quiera que actúen las cargas.



**Figura 75.** Cuadro de diálogo de parámetros.

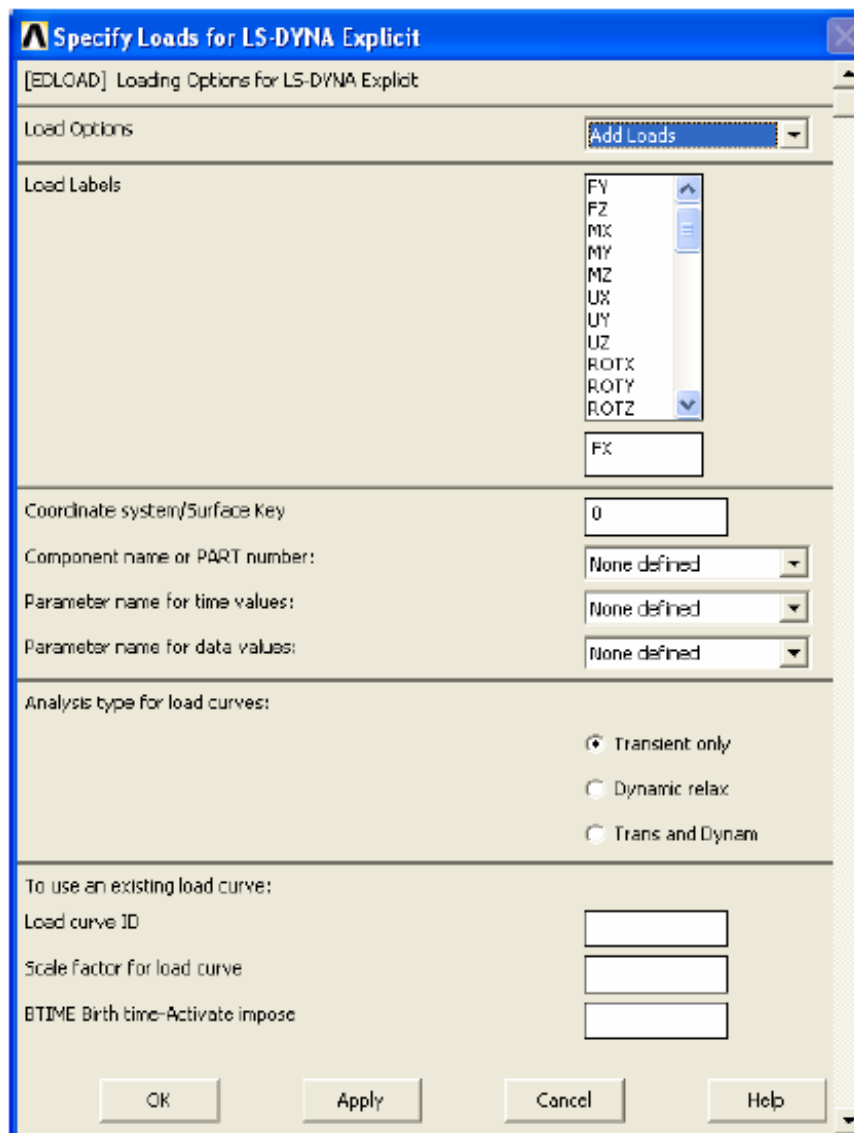


**Figura 76.** Cuadro de diálogo de definición de un vector de parámetros.

Una vez definidos los parámetros de las cargas, se seguirá la siguiente secuencia de comandos para su aplicación:

*Main Menu: Solution → Loading Options → Specify Loads*

Tras la ejecución de estos comandos, aparecerá un nuevo cuadro de diálogo (Figura 77) en el que se definirá el tipo de carga (*Load Labels*), el componente sobre el que se quiere aplicar (*component name or part number*) y posteriormente los parámetros de tiempo (*Parameter name for time values*) y carga (*Parameter name for data values*).



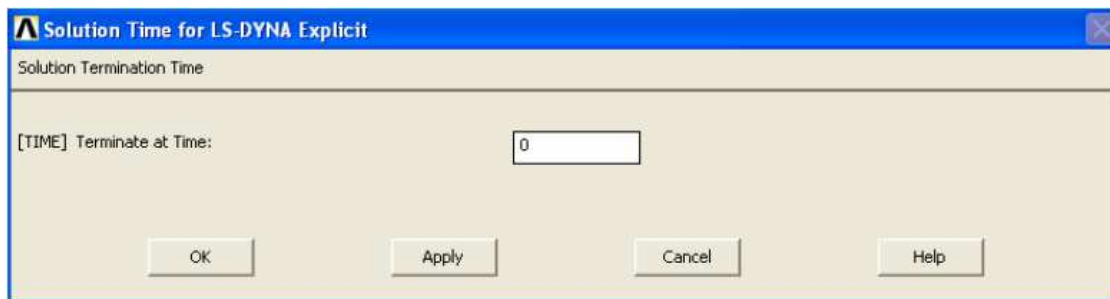
**Figura 77.** Cuadro de diálogo de definición de cargas.

### **Definición del tiempo de simulación**

El último paso antes de comenzar la solución del problema consiste en la fijación del tiempo de simulación. Este parámetro se fija siguiendo la siguiente secuencia de comandos:

*Main menu: Solution → Time Controls → Solution time*

Una vez efectuada esta operación, se visualizará la ventana mostrada en la Figura 78.



**Figura 78.** Cuadro de diálogo para definición del tiempo de simulación.

### **Resolución del problema**

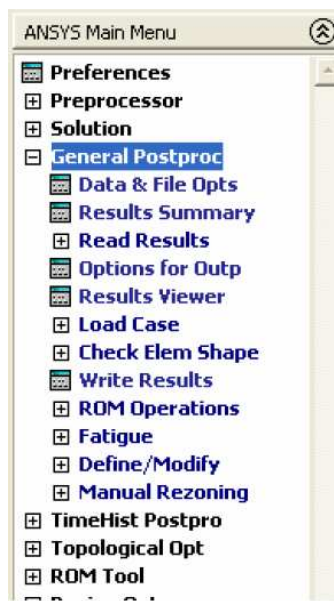
En este momento ya se tienen definidas todas las condiciones de contorno necesarias para proceder a simular el problema. La simulación se efectuará mediante el siguiente comando:

*Main menu: Solution → Solve*

Una vez ejecutado el comando, ANSYS comenzará el cálculo del problema y obtendrá un resultado del análisis. El tiempo de resolución del proceso dependerá de la complejidad del modelo, del tamaño de mallado y de la capacidad del ordenador.

### 6.1.3.3. Postproceso

El postproceso de ANSYS contiene todos los elementos necesarios para la obtención y análisis de los resultados de la simulación. Los datos se pueden visualizar como lista de resultados o de manera gráfica. En la Figura 79 se muestra el menú general del postproceso en el que se muestran todas las opciones disponibles para la generación de resultados.



**Figura 79.** Menú del postproceso.

## 6.2. CARACTERIZACIÓN Y RESOLUCIÓN DE LOS MODELOS

### 6.2.1. Introducción

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, para el estudio de la banda transportadora utilizando ANSYS se han creado dos modelos independientes. Uno permitirá realizar un estudio estático de uno de los tramos de la banda situado entre dos de los rodillos superiores, mientras que mediante el otro se llevará a cabo un estudio dinámico de la banda alrededor de uno de los tambores.

A continuación se van a explicar detalladamente cada uno de los casos comentados anteriormente.

### 6.2.2. Modelo estático

Para el estudio estático de la banda se ha elegido una de las zonas del sistema transportador que más sufre a la hora de transportar el material; el tramo de banda existente entre dos de los rodillos portantes. De esta forma, si por ejemplo se realiza una parada en la instalación, es conveniente conocer el estado tensional y deformacional que tendría la cinta en ese momento, comprobando que la presión que ejerce el material transportado es soportada por la banda sin problemas.

A continuación se van a comentar cada uno de los pasos que se han seguido en la definición y diseño del modelo.

#### 6.2.2.1. Definición, diseño y caracterización del modelo

Al tratarse de un estudio estático, el módulo de ANSYS que se ha utilizado ha sido el denominado *Multiphysics*. Por el contrario, cuando se tenga que realizar el análisis dinámico se utilizará el módulo de *Ls-Dyna*.

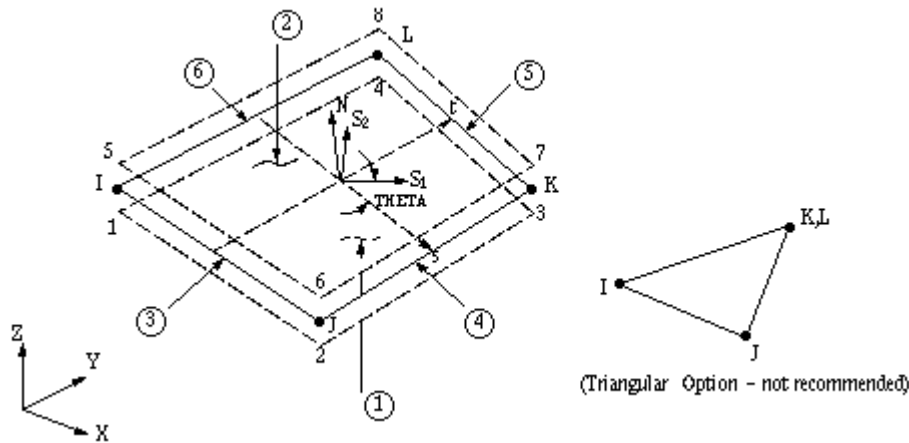
Para poder elegir un módulo u otro, habrá que ejecutar el *Product Launcher* de ANSYS mediante la siguiente secuencia de comandos:

*Programas → ANSYS → ANSYS Product Launcher*

#### Tipos de elementos

Una vez abierto ANSYS *Multiphysics*, el primer paso en el diseño del modelo fue elegir el tipo de elemento para la banda. ANSYS dispone de una gran variedad de elementos, cada uno de ellos orientado a un tipo de problema. Para la simulación de la banda se eligió el tipo SHELL181.

Se ha elegido el SHELL181 (Figura 80) ya que es un elemento tipo lámina adecuado para analizar estructuras de tipo placa con grosores moderados. Se trata de un elemento compuesto por cuatro nodos y veinticuatro grados de libertad, seis en cada nodo [19].



**Figura 80.** Elemento tipo SHELL181.

### Constantes reales

Cada uno de los elementos que se han definido y que están destinados a la caracterización de los diferentes componentes del modelo, necesita la definición de una serie de parámetros reales para fijar las propiedades de cada uno de ellos. Estas características son las llamadas constantes reales.

En este caso, el espesor de la banda es uno de los valores parametrizados que se obtienen del software de diseño de la banda y que es introducido en el archivo .txt denominado *archivoestático*, pero como valor inicial de partida se ha escogido 15 mm, mostrándose en la Tabla 28 un cuadro resumen de las constantes reales en función del tipo de elemento.

**Tabla 28.** Constantes reales de elementos.

CONSTANTE REAL	TIPO DE ELEMENTO	COMPONENTE	VALOR
SET 1	SHELL181	Banda	Espesor = 15 (mm)

### **Materiales y propiedades**

El siguiente paso se centra en la definición de los tipos de material y sus propiedades. Para cada tipo de elemento se podrán definir distintos materiales dependiendo de la finalidad de cada uno de ellos.

Para los rodillos se ha optado por un material del tipo *Rigid* ya que siempre se van a mantener y comportar como un elemento rígido frente a la banda y esto permite agilizar los cálculos. Respecto a sus propiedades (Tabla 29), se ha optado por las del acero ya que es el material más utilizado por los fabricantes en la creación de este tipo de elementos mecánicos. Para ello, se ha seguido la siguiente secuencia de comandos:

*Main menú: Preprocesor → Material Models → LS-DYNA → Rigid Material*

Por otra parte, en el caso de la banda se ha utilizado un modelo de material estructural, no lineal e hiperelástico de tipo *Mooney-Rivlin*, habiéndose considerado este el más apropiado teniendo en cuenta los materiales que se suelen utilizar en la fabricación de bandas transportadoras y que se comentaron en apartados anteriores.

Este tipo de material requiere la introducción en el programa de constantes propias en lugar del módulo de *Young* y coeficiente de *Poisson*.

Existen varias modalidades en ANSYS de definición de este material en función del número de parámetros que se quieran introducir. En el caso de la banda transportadora se ha elegido la modalidad de caracterización del material mediante dos parámetros. Estas constantes son valores propios de cada material y se estudian de manera empírica e individual para cada ejemplar.

Después de haber investigado diferentes estudios existentes de modelos creados con este tipo de material y que han sido utilizados en aplicaciones similares, se ha llegado a la conclusión de que las constantes propias de *Mooney-Rivlin* que mejor caracterizan al material de la banda transportadora son las que se muestran en la Tabla 29.



**Tabla 29.** Propiedades de los materiales del modelo estático.

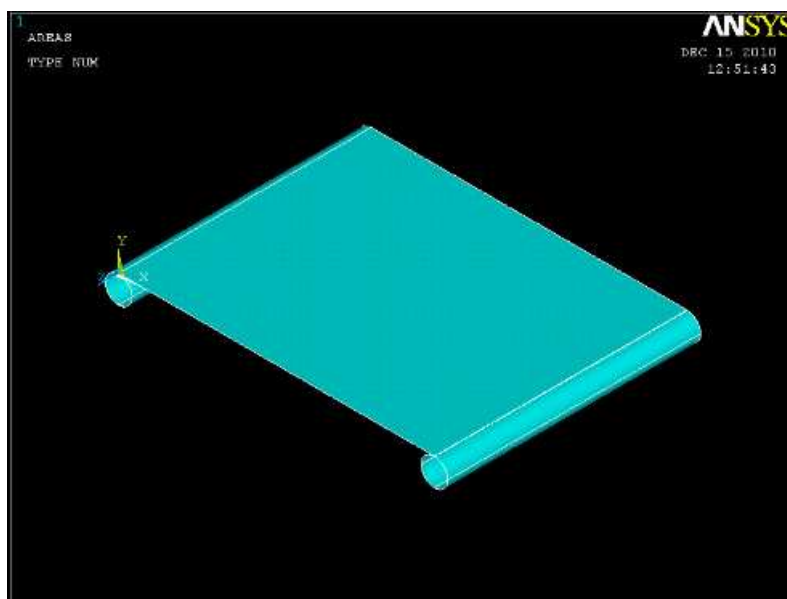
COMPONENTE	TIPO DE MATERIAL	CARACTERISTICAS
Banda	Mooney-Rivlin	C10 = 170700000 C01 = 5680000
Rodillos	Rigid	Densidad = 7850 kg/m3 Ex = 210E09 Pa Nuxy = 0.3

### Diseño de la geometría del modelo

La geometría del modelo se basa en el diseño de un tramo de banda entre dos rodillos. Para la banda, se ha creado un área rectangular a partir de cuatro *keypoints*, mientras que para los rodillos, primero se ha diseñado uno de ellos extrusionando un círculo a lo largo de la longitud del ancho de banda, y después se ha realizado una copia del primero mediante la siguiente secuencia de comandos.

*Preprocesor* → *Modeling* → *Copy* → *Areas*

El resultado es el que puede verse en la Figura 81.



**Figura 81.** Modelo de banda con rodillos.

## **Mallado del modelo**

El mallado del modelo es, posiblemente, la parte más importante para obtener un buen resultado en la resolución de un ensayo de forma que el mallado que se elija influirá en la calidad de la solución de la simulación.

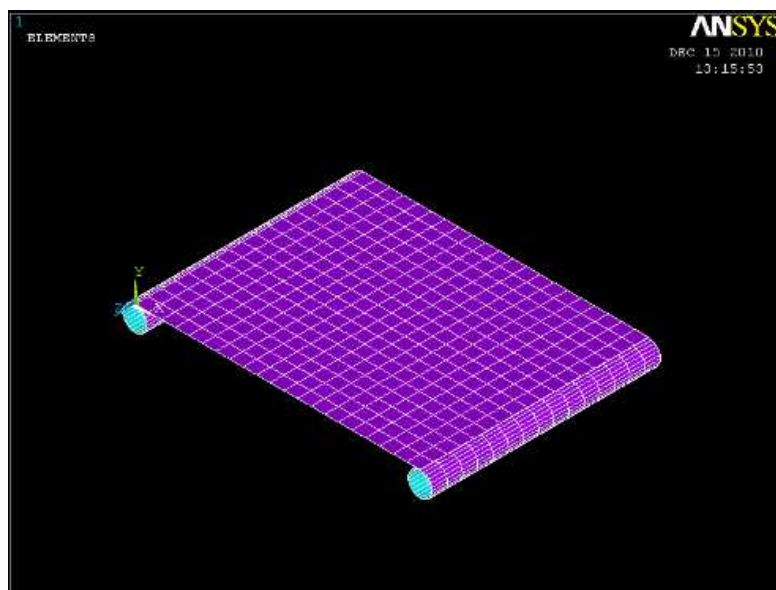
Lo primero que hay que hacer para poder mallar es asignar propiedades a las aéreas que van a ser malladas. En este caso, se ha asignado el material y constantes reales definidas anteriormente al área rectangular que representa el tramo de banda. Para ello se han seguido los siguientes pasos:

*Main menu: Meshing → Mesh Tool → Element attributes: Areas → Set*

A continuación, se ha dado la orden de comenzar con el mallado eligiendo las opciones de distribución mapeada mediante elementos rectangulares. Para ello, se deben seleccionar las áreas que se desean mallar mediante la siguiente secuencia de comandos:

*Main menu: Meshing → Mesh Tools → Areas → Mesh*

La Figura 82 muestra el resultado final después de mallar el modelo.



**Figura 82.** Mallado del modelo.

### 6.2.2.2. Resolución del problema

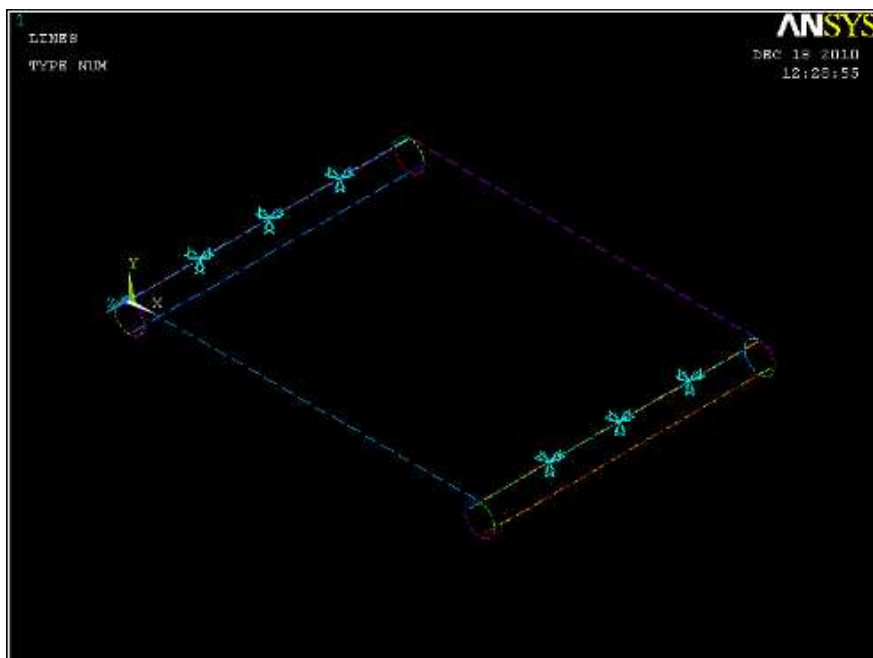
El último paso antes de comenzar con la simulación se centró en la aplicación de las condiciones de contorno. En los siguientes apartados se expondrá el proceso de aplicación de dichas condiciones.

#### Aplicación de restricciones

Durante el ensayo, se ha considerado que las líneas de la banda que se encuentran sobre los rodillos han sido restringidas. En este caso, se han bloqueado sus desplazamientos en las tres direcciones dejando libres los giros, ya que al caer el material sobre la banda estas deben poder girar. Para ello, se ha seguido la secuencia de comandos siguiente:

*Main menu: Solution → Constrains → Apply → On lines*

El resultado es el que puede verse en la Figura 83.



**Figura 83.** Visualización de las restricciones.

### Aplicación de cargas

Para conseguir el mayor realismo posible, se ha considerado una carga de presión sobre la banda de forma que simule el peso distribuido del material transportado. Para aplicar una carga de presión sobre un área, la secuencia de comandos en el *main menu* es la siguiente:

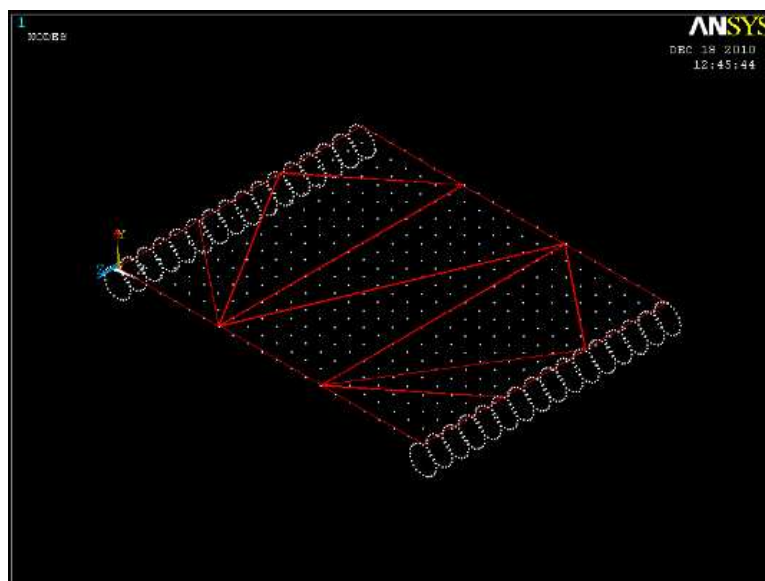
*Solution → Define Loads → Apply → Structural → Pressure → On Areas*

De esta forma, se habrá creado una presión distribuida sobre todo el área de banda existente entre los dos rodillos.

Por otra parte, también se ha introducido una carga de inercia en el sentido negativo del eje Y de forma que simula la fuerza de la gravedad. La secuencia de comandos para realizar esta operación es la siguiente:

*Solution → Define Loads → Apply → Inertia → Gravity → Global*

El resultado de la aplicación de cargas es el que puede verse en la Figura 84.



**Figura 84.** Visualización de cargas.

### **Solución**

Para comenzar la simulación se tendrá que dar la orden ejecutando el siguiente comando:

*Main menu: Solution → Solve → Current LS*

Tras seleccionar esta acción, el programa comenzará a trabajar de forma que cuando haya terminado mostrará un mensaje de aviso indicando que la solución ha sido calculada.

### **6.2.3. Modelo dinámico**

Para el estudio dinámico de la banda se ha elegido la zona más crítica del sistema transportador, la que más sufre a la hora de transportar el material; el tramo de banda que rodea a uno de los tambores. Es en este punto en el que se crean las mayores tensiones en la banda y por ello es el que debe ser estudiado y analizado.

A continuación se van a comentar cada uno de los pasos que se han seguido en la definición y diseño del modelo.

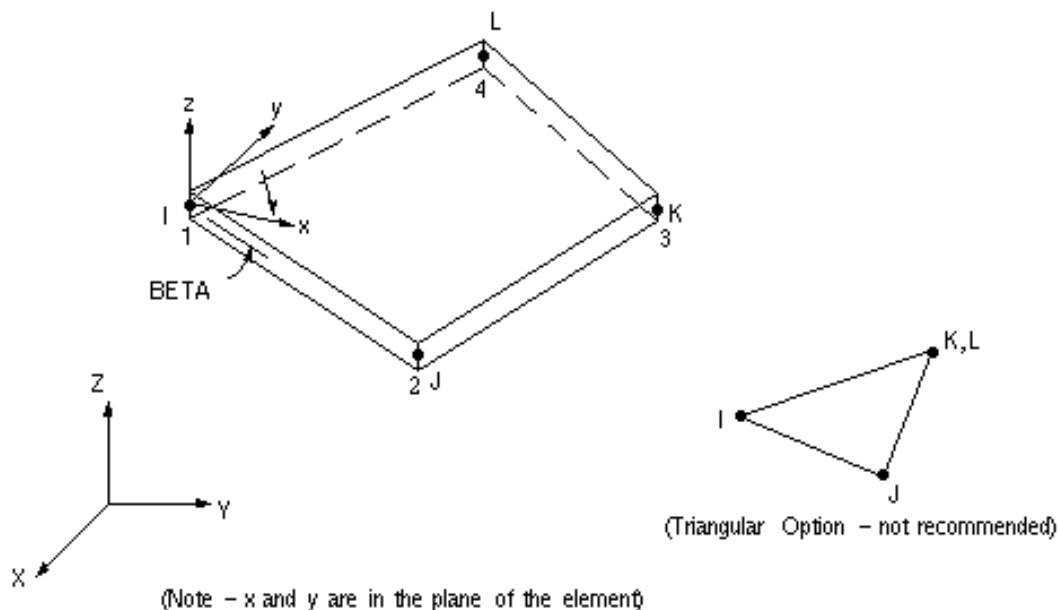
#### **6.2.3.1. Definición, diseño y caracterización del modelo**

Tal y como se comentó anteriormente, al tratarse de un estudio dinámico el módulo de ANSYS que se ha utilizado ha sido *Ls-Dyna*.

### **Tipos de elementos**

Para la simulación del modelo se ha elegido un elemento de tipo SHELL163 (Figura 85). Se trata de un tipo de elemento utilizado solamente en análisis dinámicos y que permite la utilización de cargas tanto en el plano de trabajo como en el normal a

este. Es un elemento con cuatro nodos y cuarentaiocho grados de libertad, doce en cada nudo [20].



**Figura 85.** Elemento tipo SHELL163.

### Constantes reales

Como se comentó anteriormente, cada uno de los elementos que se han elegido necesitan la definición de las constantes reales.

En esta ocasión, y como sucedía en el caso del análisis estático, se ha elegido un valor inicial de espesor de la banda de 15 mm. La Tabla 30 muestra un cuadro resumen de las constantes reales en función del tipo de elemento.

**Tabla 30.** Constantes reales de elementos.

CONSTANTE REAL	TIPO DE ELEMENTO	COMPONENTE	VALOR
SET 1	SHELL163	Banda	Espesor = 15 (mm)

### Materiales y propiedades

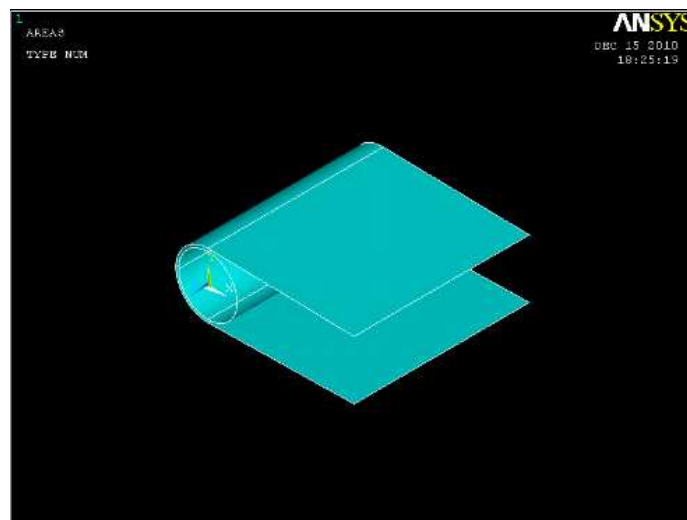
A la hora de definir los materiales de los elementos, se han utilizado los mismos materiales que en el análisis del modelo estático. De esta forma, la Tabla 31 muestra un cuadro resumen con los tipos de materiales utilizados y las características asociadas a cada uno de ellos.

**Tabla 31.** Propiedades de los materiales del modelo dinámico.

COMPONENTE	TIPO DE MATERIAL	CARACTERISTICAS
Banda	Mooney-Rivlin	C10 = 170700000 C01 = 5680000
Tambor	Rigid	Densidad = 7850 kg/m3 Ex = 210E09 Pa Nuxy = 0.3

### Diseño de la geometría del modelo

El diseño de la geometría del modelo consta de un tambor con un tramo de banda a su alrededor. Para la creación del tambor, se ha extrusionado un círculo a lo largo del ancho de banda mientras que para la banda, se ha extrusionado una línea con la forma del perfil de la banda. El resultado es el que puede verse en la Figura 86.



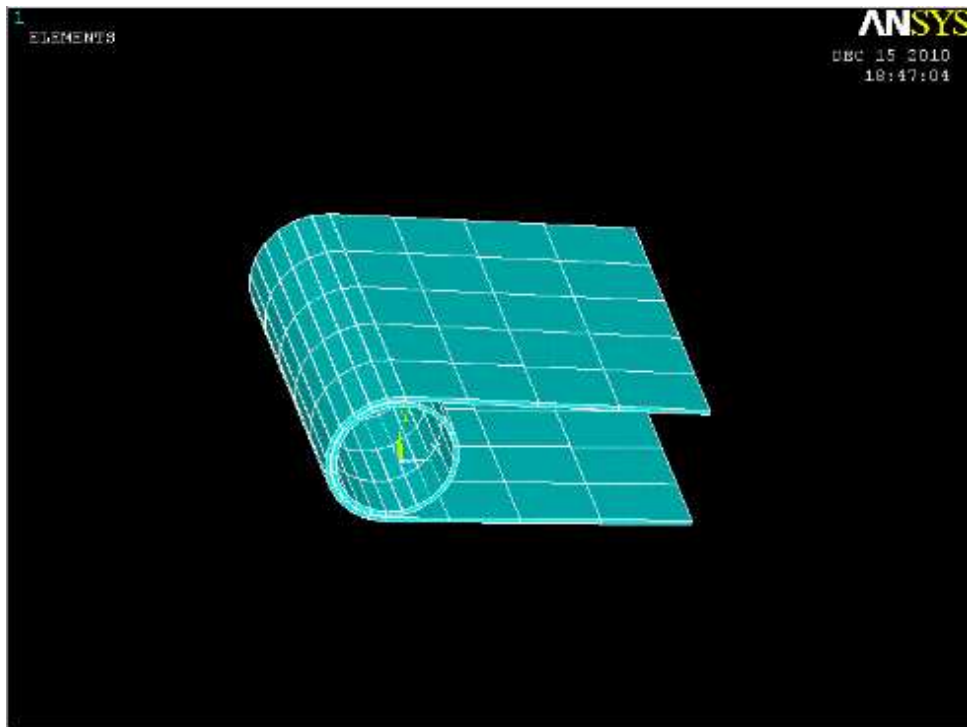
**Figura 86.** Modelo de banda con tambor.

### **Mallado del modelo**

Tal y como se comento en el caso estático, antes de mallar es necesario asignar propiedades a los elementos que van a ser mallados. De esta forma, al área que representa la banda se le ha asignado el material 1, es decir, el de tipo *Mooney-Rivlin*, y al área que representa el tambor se le ha asignado el material 2, es decir, el de tipo *Rigid*.

Una vez definidas las propiedades de los elementos, se ha procedido a mallar el modelo. Dicho mallado ha sido realizado en dos pasos, primero se ha mallado la banda y después el tambor con el fin de poder probar y experimentar diferentes refinados de malla para cada elemento por separado. Para ello, se han probado diferentes *Smart Size*, opción que se encuentra en el cuadro de dialogo de *MeshTool*, eligiendo un mallado con elementos de forma cuadrilátera y tipo de distribución mapeada.

El resultado del mallado del modelo es el que puede verse en la Figura 87.



**Figura 87.** Mallado del modelo.



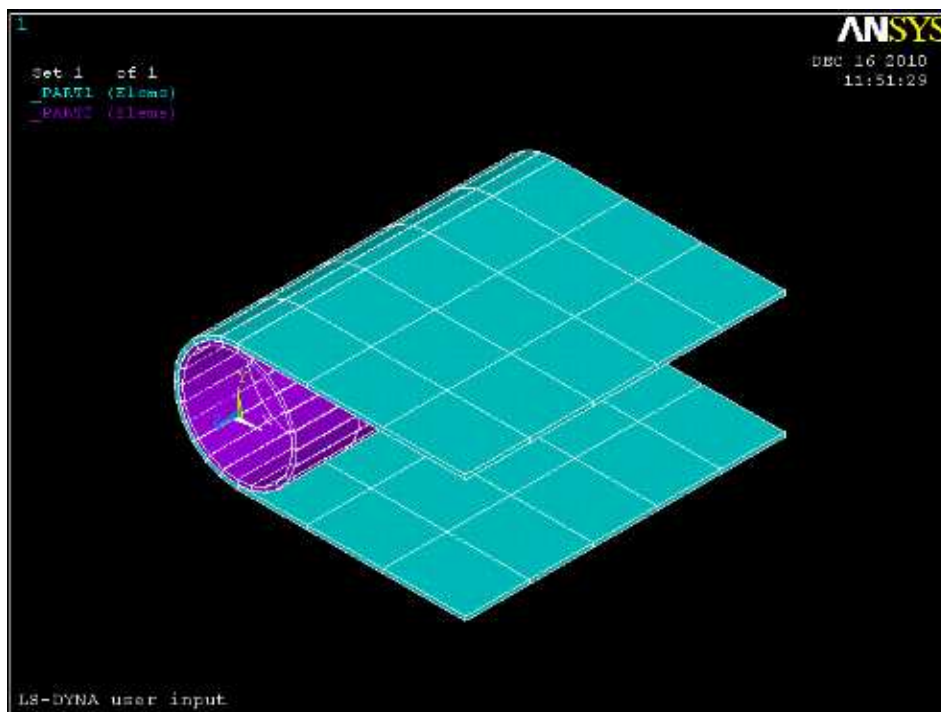
## Creación de partes

Para poder definir posteriormente los contactos entre la banda y el tambor, se deben crear primeramente las partes. Cada parte corresponde a un elemento con las mismas propiedades: tipo de elemento, material y constantes reales.

Se pueden definir mediante el comando EDPART o bien desde el *main menu* siguiendo la secuencia de comandos que se muestra a continuación:

*Preprocesor → LS-DYNA Options → Parts Options → Create all parts*

Como resultado del proceso comentado anteriormente se han obtenido dos partes, la Part1 que se corresponde con la banda y la Part2 con el tambor. En la Figura 88 pueden verse representadas dichas partes, de forma que la de color verde corresponde a la banda y la morada al tambor.



**Figura 88.** Visualización de las partes.

## Creación de componentes

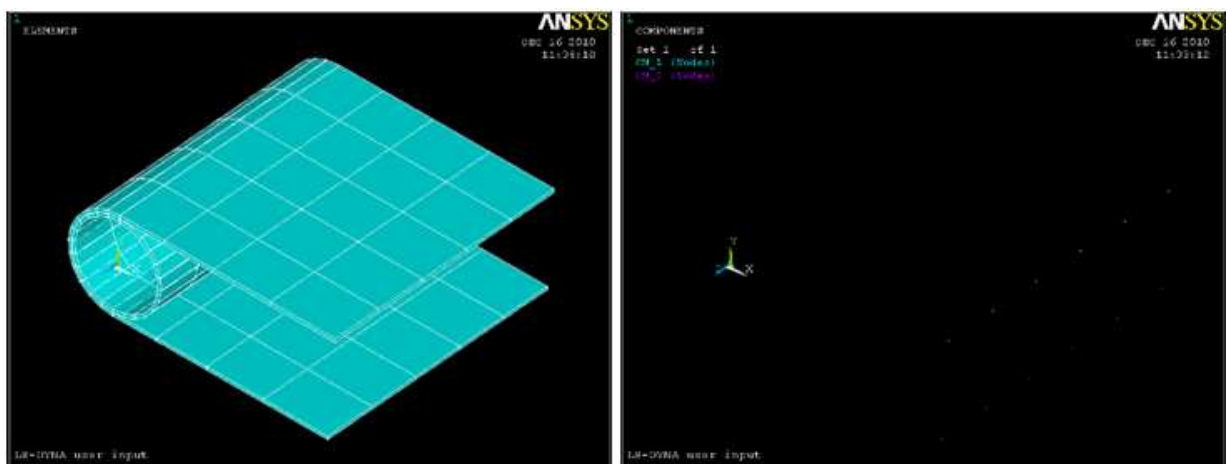
Para los modelos en los que se definen diferentes tipos de mallado y material se hace necesaria la definición de componentes.

En este caso se han creado dos componentes, uno para los nudos del extremo superior de la banda y otro para los del extremo inferior ya que es en estos extremos en los que después se aplicarán las cargas.

Para crear el primer componente se seleccionan primeramente los nudos que cumplen las condiciones  $X=1$  y  $0 < Y < 100$  mediante la opción *Select Entities (Nodes) / By Location*. A continuación, se crea el componente con los nudos seleccionados mediante la secuencia de comandos:

*Select* → *Component Manager* → *Create Component* → *Nodes*

De manera análoga, se crea el componente número dos formado por los nudos del extremo inferior de la banda. El resultado obtenido puede verse en la imagen derecha de la Figura 89.



**Figura 89.** Visualización de los Componentes.

### 6.2.3.2. Resolución del problema

Como se comentó en el caso anterior, antes de solucionar el problema y empezar con la simulación es necesario definir las condiciones de contorno.

#### **Definición de contactos**

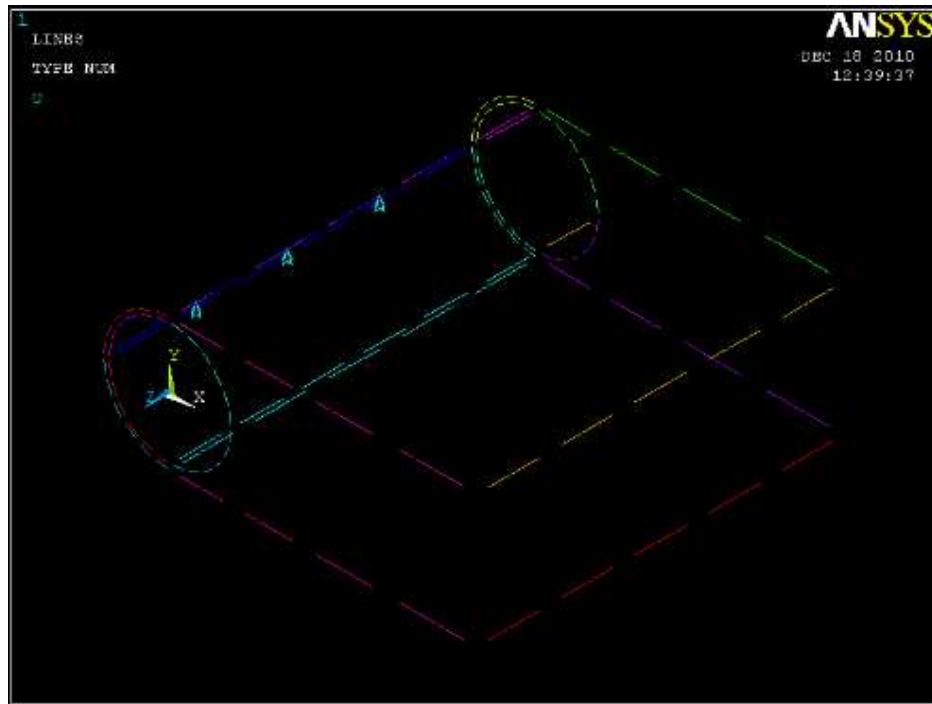
Existen tres tipos de contactos: nodo a nodo, nodo a superficie y superficie a superficie. Teniendo en cuenta el diseño del modelo, se ha escogido el tipo de contacto superficie a superficie ya que la zona de la banda y del tambor que están en contacto son superficies.

Respecto a las opciones del tipo de contacto, de todas las existentes se ha elegido la de contacto automático ya que permite el contacto entre cuerpos rígidos y deformables de forma que el programa determina automáticamente la orientación de las superficies de contacto, revisando y evaluando ambas caras. Para ello se ha seguido la siguiente secuencia de comandos en el *main menu*:

*Preprocesor → LS-DYNA Options → Contact → Define Contact*

#### **Aplicación de restricciones**

Durante el ensayo, se ha considerado que la línea horizontal según el plano XZ perteneciente a la banda y que se encuentra situada en  $Y=0$ , no puede desplazarse según el eje Y (Figura 90). Esta restricción se debe a que al existir un lado tenso y otro flojo en la banda, sino se impusiera alguna restricción de este tipo la banda rodearía al tambor y se perdería en el espacio. Sin embargo, gracias a esta condición la banda permanece siempre en contacto con el tambor pudiéndose estudiar las tensiones y deformaciones que aparecen en ella.



**Figura 90.** Visualización de las restricciones.

### Aplicación de cargas

Tal y como se comentó al principio del capítulo, es necesario crear tantos vectores como cargas diferentes se quieran aplicar así como un vector adicional destinado a la definición del tiempo de aplicación de las cargas.

En este caso se han creado tres vectores, uno para definir el tiempo, otro para definir la carga en el lado tenso de la banda y un tercer vector para la carga en el lado flojo. En el caso del vector de tiempo, se ha considerado un valor inicial de 0 y un valor final de 1. Por otro lado, los números que se introducen en los vectores de carga, son valores parametrizados que se obtienen del software de diseño de la banda transportadora de forma que, el vector que se ha denominado *cargatenso* se ha aplicado al componente número 1 en la dirección del eje X, mientras que el vector *cargaflajo* se ha aplicado al componente número 2, también en la dirección del eje X (ver Figura 91). El proceso que se ha seguido para la creación de estos vectores es el que se explicó en el apartado 6.1.3.2.



**Figura 91.** Visualización de las cargas.

### **Definición del tiempo de simulación**

Como sucedía en el caso anterior, el último paso antes de comenzar la simulación consiste en la fijación del tiempo de simulación y que este caso se ha considerado como 1.

### **Solución**

Para comenzar la simulación se tendrá que dar la orden ejecutando el siguiente comando:

*Main menu: Solution → Solve*

## 6.3. PARAMETRIZACIÓN DE LOS MODELOS

### 6.3.1. Introducción

Tal y como se comentó al inicio del presente documento, uno de los principales objetivos que se buscaba en el proyecto era la parametrización de los modelos analizados en ANSYS, de modo que se pudieran realizar las simulaciones de forma particular y personalizada para cada banda hallada mediante el software de diseño y minimizando la intervención del usuario en la generación de los modelos.

### 6.3.2. Proceso de parametrización

Como se comentó en capítulos anteriores, el software de diseño de la banda crea dos archivos con extensión .txt que serán los que hay que introducir en ANSYS para llevar a cabo la simulación de los modelos.

Para generar estos archivos, se han parametrizado algunos de los valores hallados mediante el software de cálculo y diseño de la cinta. Dependiendo de si se trata del estudio estático o dinámico, se han parametrizado unos valores u otros. La Tabla 32 muestra estos valores.

**Tabla 32.** Valores parametrizados.

Valores parametrizados	
Análisis estático	Espesor de la banda (m)
	Espaciamento entre rodillos superiores (m)
	Ancho de banda (m)
	Radio de los rodillos superiores (m)
	Presión ejercida en el tramo de banda entre dos rodillos superiores (N/m)
Análisis dinámico	Espesor de la banda (m)
	Ancho de banda (m)
	Diámetro del tambor de cola (m)
	Tensión en el lado tenso de la banda (N)
	Tensión en el lado flojo de la banda (N)

Los archivos de texto se crean a partir de dos hojas del libro Excel mediante la ejecución de una macro explicada en el capítulo anterior. La primera de las hojas da lugar al archivo para el posterior análisis estático, mientras que la segunda crea el archivo para el correspondiente análisis dinámico.

Tal y como se explicó en su momento, el archivo de texto se crea copiando el contenido de todas las casillas de la hoja Excel que no están vacías. De esta forma, para conseguir parametrizar el modelo, todas las casillas se han dejado fijas e inalterables excepto las que corresponden a los valores que varían en función del tipo de banda calculada, es decir, aquellos que se quieren parametrizar.

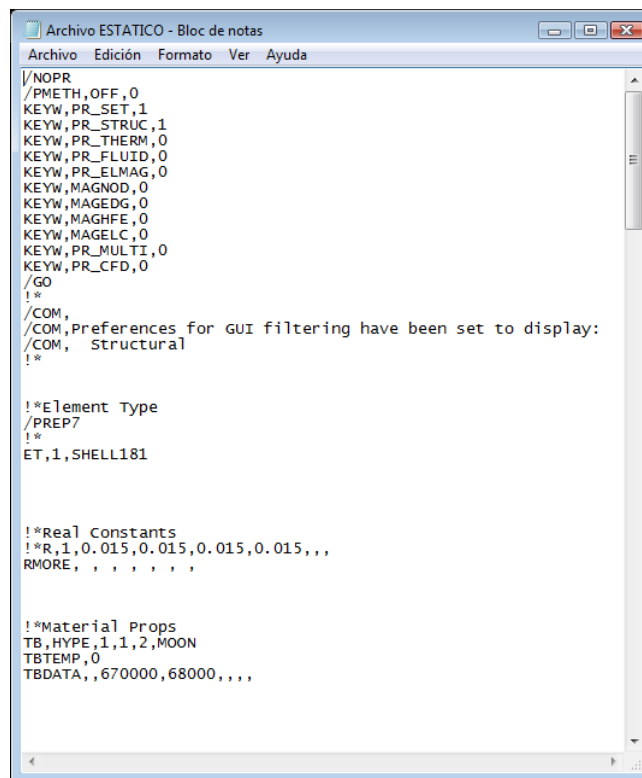
En la Figura 92 puede verse la hoja Excel llamada *txt1* a partir de la cual se creará el archivo de texto para el análisis estático. En ella se puede comprobar que las casillas con fondo azul son las que contienen los valores parametrizados, tales como espesor de la banda (0.015), distancia entre rodillos superiores (1.5) o ancho de banda (1.2), de forma que serán solo estas casillas las que cambien en cada diseño y cálculo de una nueva banda.

	A	B	C	D	E	F	G	H
25	ET,1,SHELL181							
26								
27								
28								
29								
30	!*Real Constants							
31	R,1,	0.015		0.015		0.015		0.015
32	RMORE, , , , , , ,							
33								
34								
35								
36	!*Material Props							
37	TB,HYPE,1,1,2,MOON							
38	TBTEMP,0							
39	TBDATA, ,670000,68000, , , ,							
40								
41								
42								
43								
44	!*Modeling banda							
45								
46	K, ,0,0,0,							
47	K, ,	1.5		0		0		
48	K, ,	1.5		0		-1.2		
49	K, ,	0		0		-1.2		
50	/VIEW,1,1,1,1							
51	/ANG,1							
52	/REP,FAST							
53	FLST,2,4,3							
54	FITEM,2,1							

**Figura 92.** Hoja Excel para análisis estático.

### 6.3.3. Resultado del proceso de parametrización

Teniendo en cuenta los comentarios del apartado anterior, una vez que el usuario haya llegado a la última pestaña del software de diseño de la banda, la destinada a los resultados (Figura 55), y pulse los botones de creación de archivos de texto, se crearán los dos archivos en los que se encontrarán todos los valores específicos y personalizados necesarios para simular en ANSYS la banda que haya diseñado, así como todas las órdenes y comandos de ANSYS debidamente automatizados para garantizar la correcta generación del modelo de forma transparente para el usuario. La Figura 93 muestra un ejemplo del archivo de texto creado por el software para un posterior análisis estático utilizando ANSYS.



```

/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
!*

!*Element Type
/PREP7
!*
ET,1,SHELL181

!*Real Constants
!*R,1,0.015,0.015,0.015,0.015,,,
RMORE, , , , , ,

!*Material Props
TB,HYPE,1,1,2,MOON
TBTEMP,0
TBDATA,,670000,68000,,,,

```

**Figura 93.** Ejemplo de archivo de texto para análisis estático de la banda.

De esta forma, se habrá conseguido parametrizar el programa logrando que los archivos de texto creados sean diferentes dependiendo del tipo de banda que haya sido diseñada y calculada por el usuario.



# CAPITULO 7

## RESULTADOS

### 7.1. OBTENCION DE RESULTADOS

Para poder calcular y estudiar los resultados derivados de todo el proceso de cálculo y diseño explicado en capítulos anteriores, se ha optado por obtener los datos necesarios para la simulación de los modelos a partir de un ejemplo real de transporte de material mediante una banda transportadora.

Los datos de partida del problema son:

Denominación del material: carbón

Densidad aparente:  $1200 \text{ kg/m}^3$

Ángulo de reposo:  $30^\circ$

Ángulo de sobrecarga:  $20^\circ$

Ángulo de máximo de inclinación:  $18^\circ$

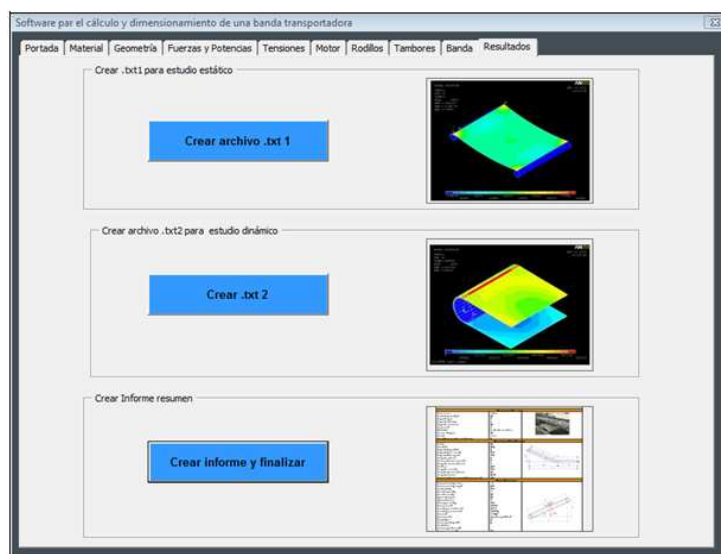
Temperatura:  $30^\circ$

Abrasividad: moderada

Tamaño máximo de grano: 140 mm  
 Tipo de mezcla: uniforme  
 Ancho de banda: 1200 mm  
 Velocidad de banda: 1.31 m/s  
 Capacidad requerida: 1000 ton/h  
 Tipo de rodillos superiores: terna  
 Ángulo de rodillos superiores: 35 °  
 Longitud de tramo horizontal: 100 m  
 Longitud de proyección horizontal tramo inclinado: 90 m  
 Longitud de elevación o descenso: 20 m

Una vez introducidos los datos anteriores en el software de diseño de la banda, se ha ido avanzando por las diferentes pestañas del programa obteniendo todos los valores relativos a las fuerzas y tensiones creadas en la cinta, así como todos los datos relacionados con el motor, rodillos, tambores y banda de la instalación calculada.


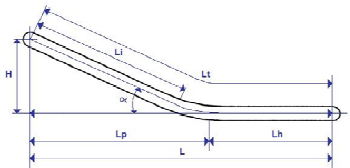
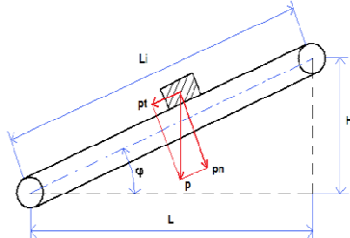
Tal y como se comentó en el capítulo anterior, la última pestaña del software está dedicada a los resultados (Figura 94). De esta forma y como se explicó en su momento, existen tres botones en esta ventana de manera que dos de ellos se destinan a la creación de los dos archivos de texto para el posterior análisis de la banda en ANSYS mientras que el tercer botón sirve para crear un informe resumen que contiene los datos hallados y calculados en todas las pestañas anteriores del software.



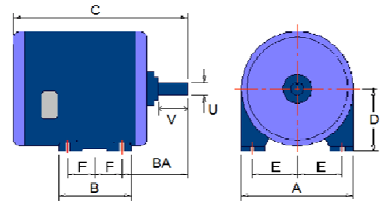
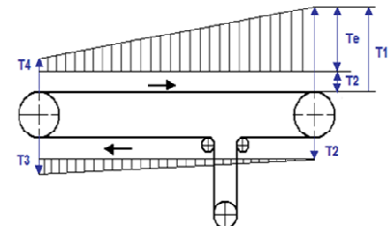
**Figura 94.** 10ª pestaña del software: Resultados.


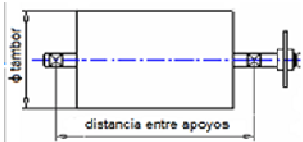
Teniendo en cuenta lo comentado anteriormente, el usuario obtendrá en pantalla un informe resumen de todos los componentes y características de la banda que ha diseñado. El informe resumen del ejemplo que se ha llevado a cabo es el que puede verse en la Tabla 33.

**Tabla 33.** Informe resumen de la banda transportadora calculada.

Informe de la banda transportadora calculada		
Características del material		
Denominación del material	carbón	
Densidad aparente (kg/m3)	1200	
Ángulo de reposo (°)	30	
Ángulo de sobrecarga (°)	20	
Ángulo de más. Inclinación (°)	18	
Temperatura (°C)	30	
Abrasividad	B. moderada	
Tamaño máx. de grano (mm)	140	
Mezcla (%)	uniforme	
Factor K1 en función del tamaño de grano	1	
Características de la banda		
Ancho (mm)	1200	
Velocidad (m/s)	1.31	
Capacidad requerida (t/h)	1000	
Capacidad volumétrica (m3/h)	738	
Capacidad de transporte (t/h)	886	
Longitud tramo horizontal (m)	100.0	
Proyección horizontal tramo inclinado (m)	90.0	
Longitud elevación o descenso (m)	20.0	
Pendiente (°)	12.5	
Longitud tramo inclinado (m)	92.2	
Longitud total (proyección horizontal) (m)	190.0	
Longitud total (trayectoria) (m)	192.2	
Coefficiente reducción capacidad por inclinación K:	0.9	
Fuerzas y Potencias		
Coefficiente fricción partes móviles	0.02	
Coefficiente fricción por longitud	1.42	
Peso banda (kg/m)	23	
Peso rodillos superiores (kg)	20	
Peso rodillos inferiores (kg)	18	
Espacio rodillos superiores (m)	1.5	
Espacio rodillos inferiores (m)	3.0	
Peso total partes móviles (kg/m)	64.3	
Fuerza en vacío (N)	3396.4	
Fuerza desplazamiento horizontal (N)	9918.3	
Fuerza desplazamiento vertical (N)	36822.0	
Fuerza total (N)	50136.7	
Guías, carros o ambos	A. guías de carga	
Longitud guías (m)	10.0	
Potencia requerida guías (KW)	1.0	

Cantidad carros	0	
Potencia requerida carros (KW)	0.0	
Potencia teórica total (KW)	66.7	
Eficiencia motor (%)	92	
Eficiencia transmisión (%)	90	
Potencia requerida (KW)	80.6	
<b>Tensiones</b>		
Coefficiente fricción tambor-banda	0.4	
Ángulo de contacto (°)	180	
Factor accionamiento	0.40	
Tensión efectiva (N)	50936.7	
Tensión 1 lado tenso preliminar (N)	71201.3	
Tensión 2 lado flojo preliminar (N)	20264.6	
Tensión 3 (~T4) de retorno preliminar (N)	21770.7	
Tensión contrapeso mínima (N)	43541.5	
Tensión contrapeso escogida (N)	45000.0	
Tensión 1 final (N)	72659.8	
Tensión 2 final (N)	21723.1	
Tensión 3 final (N)	23229.3	
Tensión mínima "o" antipandeo (N)	19347.2	
Tensión de trabajo unitaria (N/mm)	60.55	
<b>Características del motor</b>		
Potencia requerid (KW)	80.59	
Potencia requerida (HP)	108.07	
Potencia motor elegida (HP)	150	
A (mm)	60	
B (mm)	58	
C (mm)	109	
D (mm)	30	
E (mm)	23.44	
F (mm)	22.44	
U (mm)	7.94	
V (mm)	19	
BA (mm)	22.44	
<b>Características de la banda</b>		
Abrasividad	B. moderada	
Tamaño máx. de grano (mm)	140	
Tiempo de recorrido (min)	2.45	
Espesor recubrimiento superior (mm)	6	
Espesor recubrimiento inferior (mm)	3	
Tipo de banda	banda textil	
Espesor carcasa textil (mm)	6	
Espesor carcasa metálica (mm)	0.0	
Espesor total de la banda (mm)	15	
Diámetro del rollo de banda (mm)	2977.4	
<b>Características de los rodillos</b>		
<u>Rodillos superiores:</u>		
Diámetro (mm)	127.0	
Tipo	terna	
Ángulo (°)	35	
Desalineamiento (mm)	3	
Carga en rodillo (kg)	317.61	
Velocidad del rodillo (r.p.m.)	197	
Cantidad aproximada de rodillos:	128	



<b>Rodillos inferiores:</b>		
Diámetro (mm)	127.0	
Tipo	plano	
Ángulo (°)	0	
Desalineamiento (mm)	6	
Carga en rodillo (kg)	83.14	
Velocidad del rodillo (r.p.m.)	197	
Cantidad aproximada de rodillos:	64	
<b>Características de los tambores</b>		
Diámetro tambor motriz (mm)	800	
Diámetro tambor de cola (mm)	400	
Distancia entre apoyos tambor motriz (mm)	1830	
Distancia entre apoyos tambor de cola (mm)	1830	
Ancho de cara de los tambores (mm)	1275	

Por otra parte y tal y como se ha comentado, el software también ha creado los dos archivos de texto que contienen el código necesario para la simulación estática y dinámica de la banda mediante ANSYS.

Una vez creados los archivos de texto, habrá que cargarlos en ANSYS mediante la siguiente secuencia de comandos:

*Archivo → Read input from*

Después de haber cargado el archivo, solo habrá que solucionar el problema siguiendo la secuencia de comandos que se muestra a continuación:

*Main menu: Solution → Solve → Current LS*

Para que el programa pueda interpretar los datos obtenidos del proceso de resolución del problema, es necesario que primero los lea. Para ello, se ha de aplicar la siguiente secuencia de comandos en la *main menu*:

*General Postproc → Read Results → First Set (or Next, or Last...)*

Una vez que el programa ha reconocido todos los datos, se puede comenzar con la visualización y estudio de los resultados.

## 7.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez que el programa ha leído los resultados hallados mediante el proceso de cálculo de la solución del problema, se ha procedido a la obtención de gráficas para ilustrar diferentes valores derivados de la simulación. A continuación se estudiarán de manera independiente los resultados de los modelos estático y dinámico.

### 7.2.1. Resultados del modelo estático

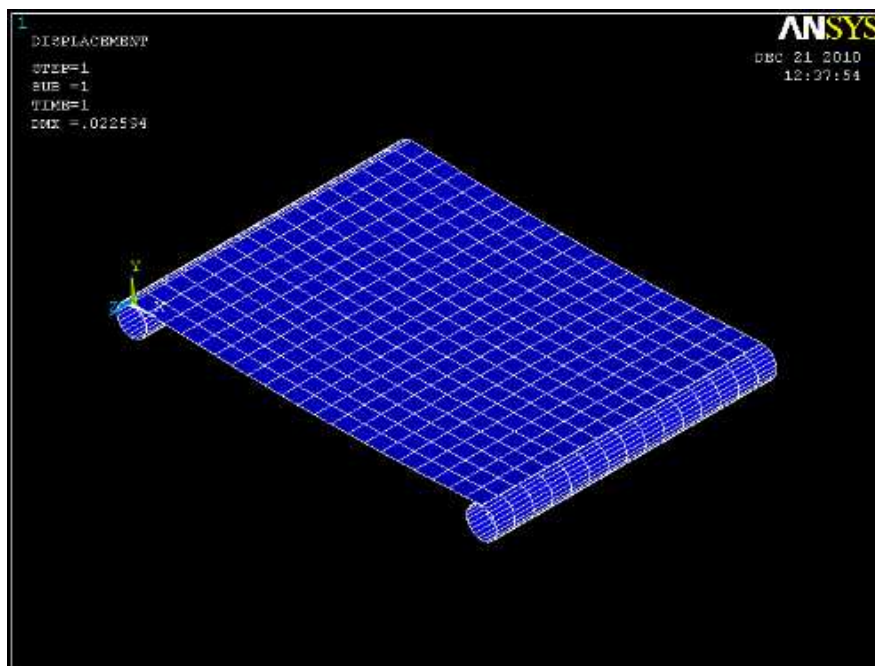
Para proceder al estudio de los resultados calculados, se han obtenido gráficas de la deformada y de los estados tensionales del mismo.

#### 7.2.1.1. Análisis de deformación del modelo

Para poder obtener una gráfica ilustrativa de la deformación que han sufrido los distintos elementos del modelo, se ha seguido la siguiente secuencia de comandos:

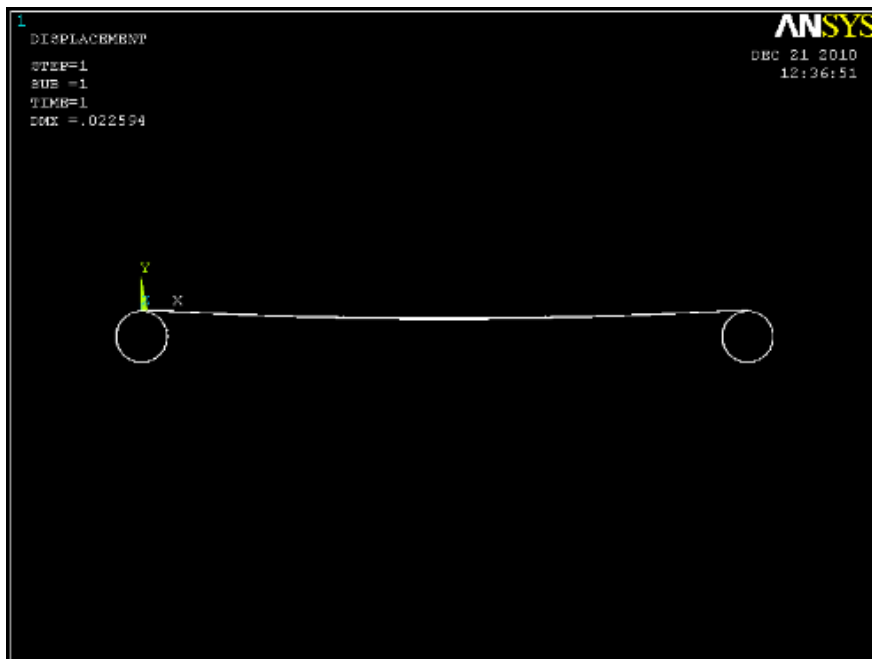
*Main menu: General Postproc → Plot Results → Deformed Shape*

Como resultado se ha obtenido la imagen de la Figura 95.



**Figura 95.** Deformada del modelo.

Como puede verse, la deformación obtenida en la banda no es muy grande. Para poder apreciarla mejor, la Figura 96 muestra una vista frontal del modelo.



**Figura 96.** Deformada del modelo vista frontal.

El desplazamiento máximo que ha sufrido la banda se ha producido en el sentido negativo del eje Y obteniendo un valor de 0.022534 metros.

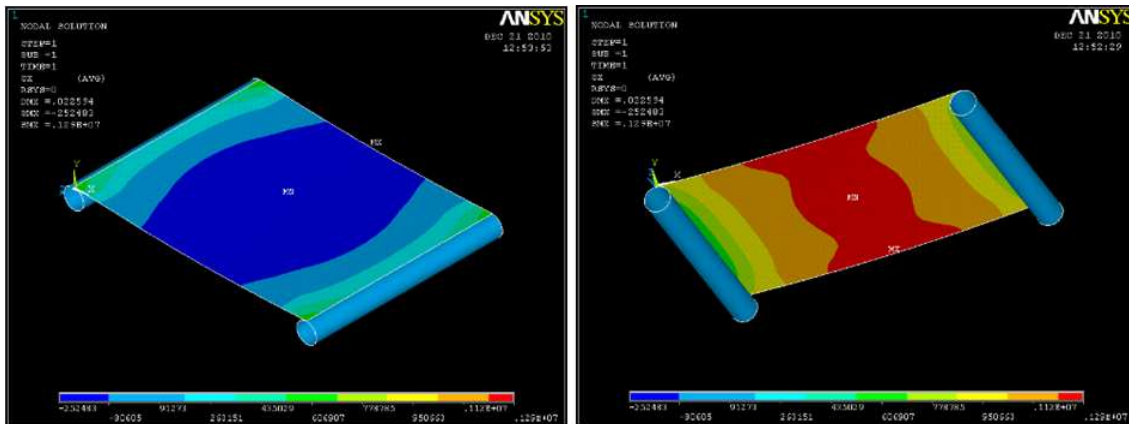
#### 7.2.1.2. Análisis de tensiones del modelo

Para poder obtener gráficas ilustrativas de los esfuerzos, tensiones, desplazamientos, etc. que han sufrido los distintos elementos del modelo, se ha seguido la siguiente secuencia de comandos:

*Main menu: General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal solution → Stress (or Strain, Energy...)*

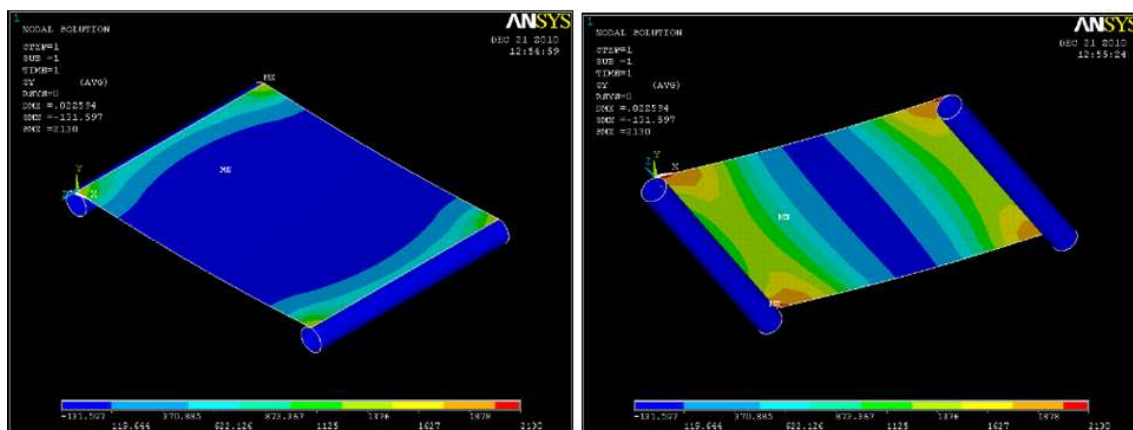
Teniendo en cuenta la secuencia anterior, a continuación se van a exponer distintas gráficas que muestran los valores mínimos y máximos de las diferentes tensiones sufridas por los elementos así como los puntos donde se han producido.

La Figura 97 muestra la distribución de tensiones según la dirección del eje X. Como puede verse y teniendo en cuenta la escala de colores, el valor de máxima tensión de compresión aparece en la zona central de la cara superior de la banda y alcanza un valor de 252.43 KPa, mientras que la tensión de tracción máxima se da en la cara inferior, obteniendo un valor de 1290 KPa. Este resultado es completamente lógico teniendo en cuenta la geometría y restricciones existentes en el modelo.



**Figura 97.** Distribución de tensiones según el eje X.

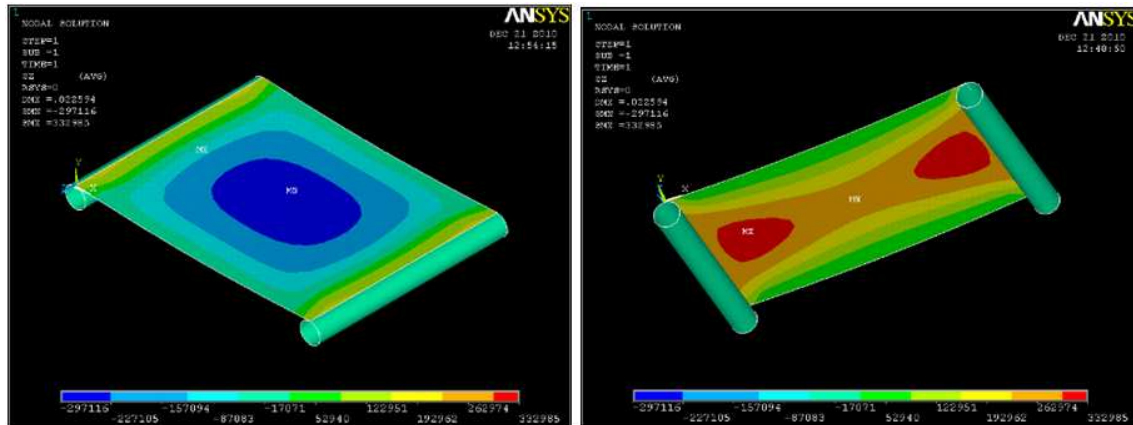
De manera análoga, la Figura 98 muestra la distribución de tensiones según el eje Y. Al tratarse del eje de dirección de aplicación de la carga, y al ser perpendicular al plano XZ, plano paralelo a la superficie de la banda, las tensiones obtenidas son prácticamente nulas, siendo 2.13 KPa el mayor valor alcanzado.



**Figura 98.** Distribución de tensiones según el eje Y.

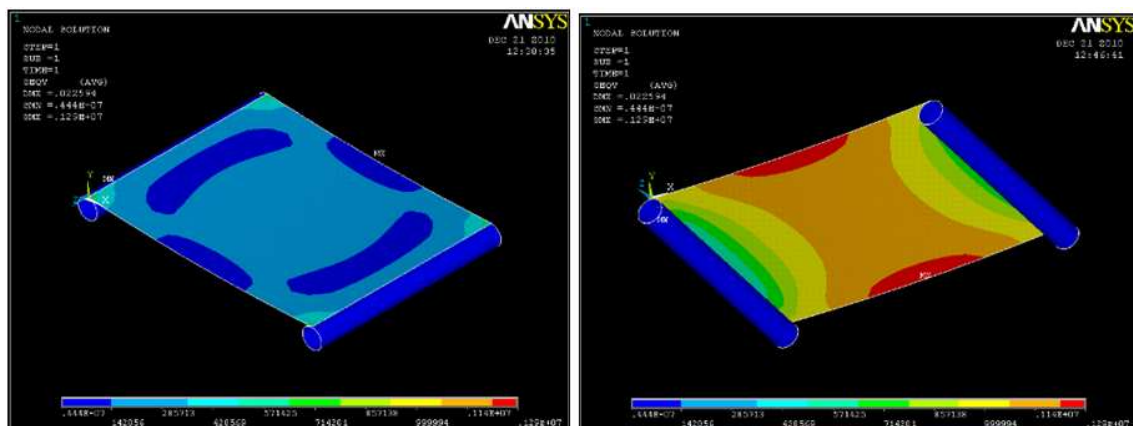


Por último, la Figura 99 muestra la distribución de tensiones según el eje Z. En este caso y teniendo en cuenta la escala de colores, el máximo valor de compresión obtenido ha sido 297.116 KPa mientras que el de tracción ha sido 332.985 KPa, alcanzándose dicho valor en la cara inferior de la banda.



**Figura 99.** Distribución de tensiones según el eje Z.

Teniendo en cuenta las gráficas y valores obtenidos anteriormente, se ha comprobado que existen tensiones según las tres direcciones posibles. De esta forma, resultaría más útil obtener una imagen donde quedara reflejada la distribución de tensiones global, es decir, según las tres direcciones del eje de trabajo. Para poder ilustrar dicha distribución, se ha calculado la distribución de tensión de Von Mises (Figura 100).



**Figura 100.** Distribución de tensión de Von Mises.

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado debe su nombre a Richard Edler von Mises (1913) quien propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor [21].

De esta forma, el criterio de Von Mises considera las tensiones normales y tangenciales del modelo, llegándose a un resultado global del estado tensional del mismo. En la Figura 100 puede comprobarse que la tensión máxima obtenida tiene un valor de 1290 KPa, estando localizada en los bordes laterales de la zona intermedia de la cara inferior de la banda.

Como conclusión se puede decir que las gráficas obtenidas por el programa y comentadas anteriormente, ilustran deformaciones y distribuciones de valores tensionales completamente coherentes y acertadas teniendo en cuenta las cargas y restricciones aplicadas en el modelo.

### **7.2.2. Resultados del modelo dinámico**

Para proceder al estudio de los resultados calculados a partir de la solución del problema dinámico, se han obtenido diferentes gráficas que se explican a continuación.

#### **7.2.2.1. Análisis de tensiones del modelo**

En el caso del problema dinámico y tal y como se ha comentado anteriormente, se ha utilizado el módulo *Ls-Dyna* de ANSYS. Una vez cargado el archivo (*Read input from*), solucionado el problema (*Solution* → *Solve* → *Current LS*) y leído los resultados (*Read results*), se pueden realizar análisis gráficos de los resultados de manera análoga al caso anterior.

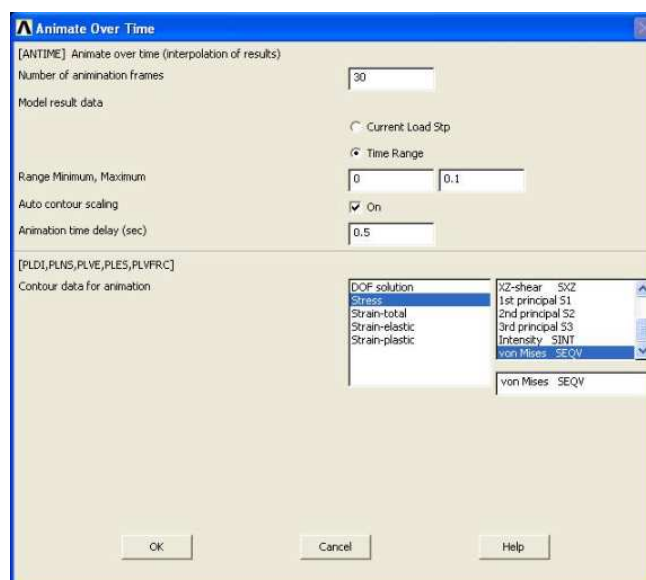
*Ls-Dyna* permite la posibilidad de crear una animación dinámica compuesta de distintas imágenes consecutivas que ilustran los diferentes estados alcanzados en el

modelo para unos momentos determinados dentro del tiempo que se marcó como tiempo límite de simulación.

Para que el usuario pueda crear una animación ha de seguir la siguiente secuencia de comandos:

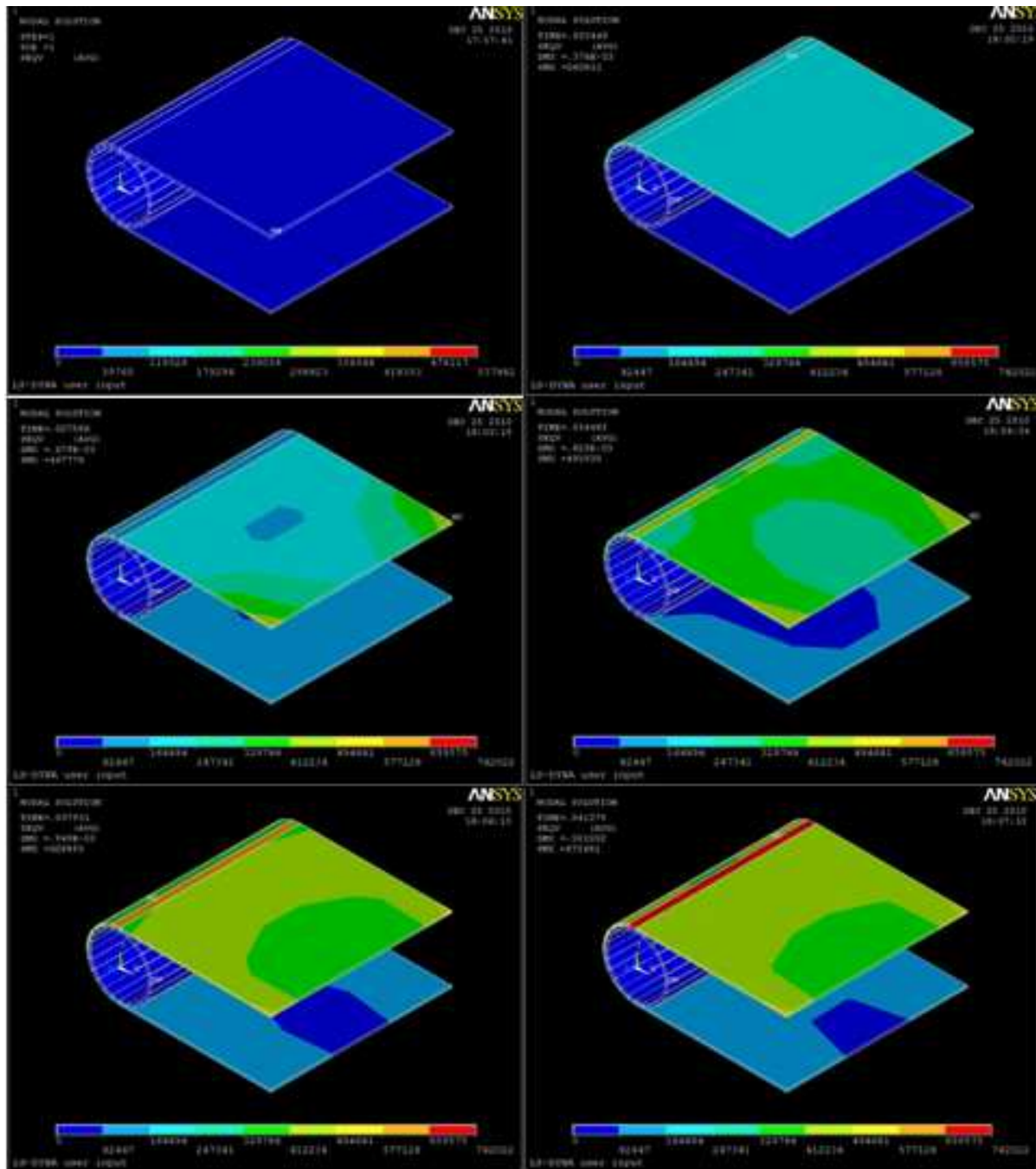
*PlotCtrls*→*Animate* →*Over time*

Una vez ejecutada la orden anterior, aparecerá en pantalla la imagen de la Figura 101. En ella puede verse como existen diferentes opciones a la hora de crear el video tales como la definición del número de fragmentos en que quiere dividirse la animación o el rango de tiempo mínimo y máximo que delimita la duración de la misma.



**Figura 101.** Cuadro de opciones de animación.

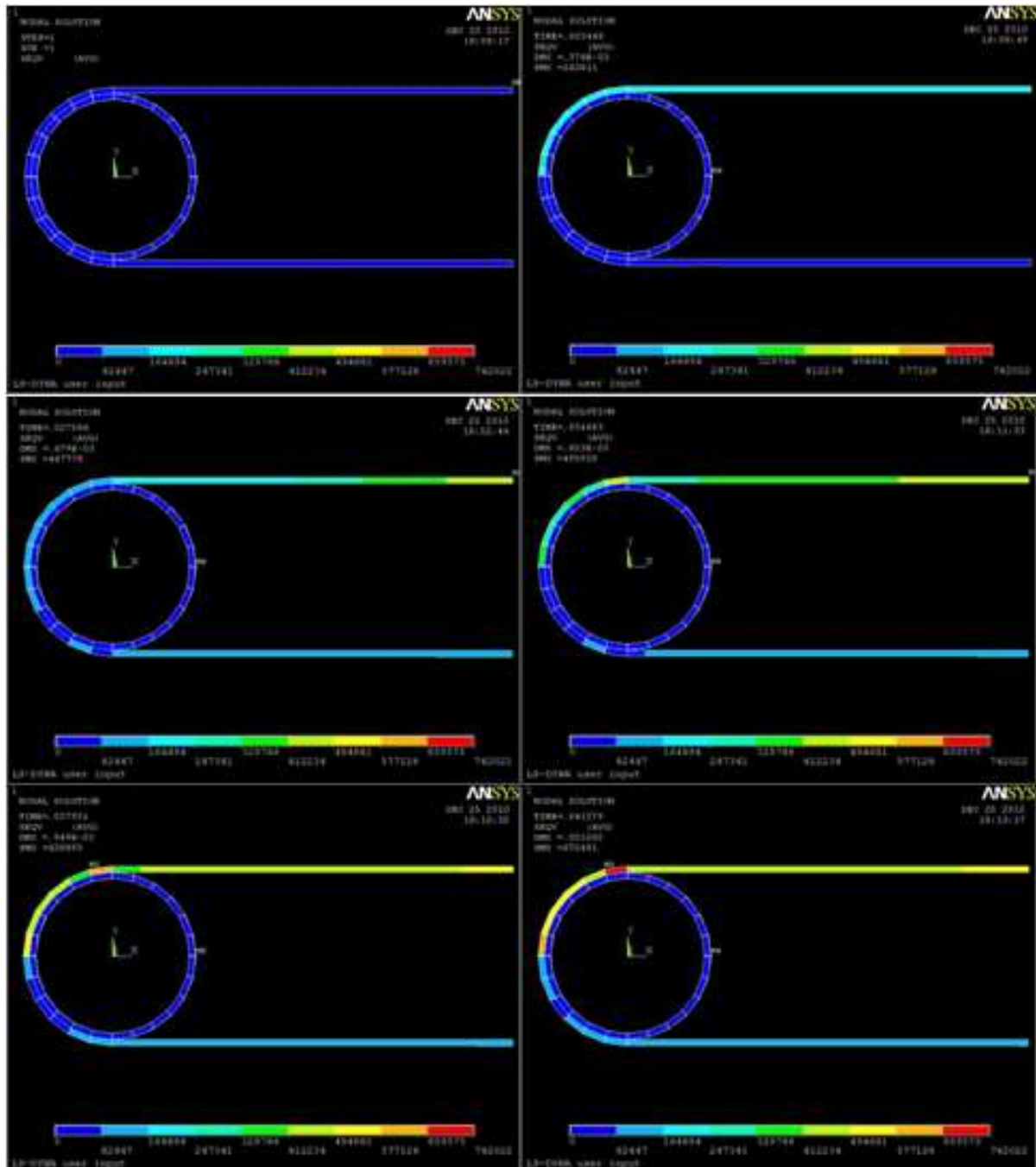
En el caso del modelo de banda que se está estudiando, se ha elegido una composición de 30 fragmentos con un rango de tiempo de 0 a 0.1 segundos (Figura 101). Por otra parte, las opciones de vídeo también permiten elegir la representación de deformaciones o tensiones. En este caso, al ser muy pequeña la deformación sufrida por la banda alrededor del tambor, se ha considerado que no era un dato representativo de los resultados obtenidos. De este modo, se ha elegido estudiar la tensión de Von Mises instantánea producida en la cinta como consecuencia de las tensiones creadas en el lado tenso y el lado flojo de la banda, obteniéndose la animación que se muestra y explica a continuación.



**Figura 102.** Resumen de la animación.

La Figura 102 muestra una serie de imágenes capturadas durante la animación. En ella se puede ver un resumen del resultado obtenido mediante imágenes que ilustran la distribución de tensión de Von Mises en diferentes momentos durante el proceso de aplicación de las cargas en los extremos de la banda, desde el instante inicial hasta el momento en el que se alcanza la tensión máxima creada en la banda.

Para poder comparar de una manera más intuitiva y rápida las tensiones creadas en el lado tenso y flojo de la banda, se ha obtenido otro resumen de la animación mediante imágenes tomadas frontalmente. El resultado es el que puede verse en la Figura 103.



**Figura 103.** Resumen de la animación en vista frontal.

Como puede verse en la Figura 102 y teniendo en cuenta la escala de colores que en ella aparece, el extremo superior de la cinta, es decir, el que corresponde al lado tenso de la banda, sufre una mayor tensión que la parte inferior, la que corresponde al lado flojo.

Tal y como se aprecia en la imagen, tanto el lado superior como el inferior se van cargando progresivamente a medida que avanza el tiempo. De esta forma, se puede comprobar que para un tiempo de 0.034483 segundos la tensión mayor que aparece en el lado tenso de la banda es de 577.12 MPa, para 0,037931 segundos es de 659.57 MPa y para 0.041379 segundos es de 742.02 MPa, siendo este el mayor valor obtenido.

De manera análoga al caso anterior, la máxima tensión alcanzada en el lado flojo de la banda, es decir, el inferior, es de 329.79 MPa, alcanzándose dicho valor a los 0.041379 segundos.

Después de estudiar todas las imágenes obtenidas, se ha comprobado que la distribución de tensiones creada en la banda es la esperada. De esta forma y como puede apreciarse en las ilustraciones, las tensiones van aumentando a medida que avanza el tiempo de aplicación de las cargas, consiguiéndose los mayores valores en el lado tenso de la cinta.

# CAPITULO 8

## CONCLUSIONES

### 8.1. CONCLUSIONES

Al inicio del proyecto se estableció como objetivo principal la creación de un software para el diseño y cálculo de bandas transportadoras y el posterior estudio estático y dinámico de la banda calculada basándose en el método de los elementos finitos.

La creación y programación del software se ha llevado a cabo mediante el editor de *Visual Basic* que lleva integrado *Microsoft Office Excel*. Por otra parte, para el diseño, caracterización y simulación de los modelos arrojados por el software, se ha utilizado el programa ANSYS, el cual es un software de simulación desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos.

Respecto al estudio estático de la banda, se ha utilizado el módulo *Multiphysics* de ANSYS, mientras que para la realización de todas las operaciones necesarias para el cálculo de la solución del problema dinámico, se ha optado por el procesador *Ls-Dyna*, a través del cual se han calculado todos los esfuerzos, movimientos y deformaciones del tramo de banda que rodea al tambor.

Una vez obtenidos los resultados de los diversos ensayos, se han extraído diferentes gráficas y diagramas para la comprensión de las soluciones obtenidas. Las gráficas calculadas representan los desplazamientos y tensiones de diferentes elementos de la estructura diseñada en cada modelo. Adicionalmente, en el caso del estudio dinámico se ha creado una animación en la que pueden verse los distintos pasos y fases que atraviesa la banda desde un instante inicial hasta otro final.

Tras la obtención, estudio y comprensión de los resultados finales obtenidos, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- En el presente proyecto se ha utilizado *Visual Basic* para la programación del software, el módulo *Multiphysics* de ANSYS para la simulación del modelo estático y *Ls-Dyna* para el dinámico. Mediante la asociación de estas herramientas, la parametrización de los archivos de texto arrojados por el software de cálculo de la banda, y una vez solucionados los problemas de intercomunicación entre ellas, se ha conseguido una buena solución para los problemas no lineales explícitos. Llegados a este punto se puede afirmar que la colaboración entre estos programas se convierte en una buena herramienta para el diseño, cálculo y simulación de una banda transportadora.
- La parametrización de los valores necesarios para los estudios estático y dinámico de la banda ha conseguido crear un sistema de análisis mediante elementos finitos de fácil comprensión y utilización para el usuario, logrando que pueda obtener buenos resultados mediante un procesador potente como es *Ls-Dyna* sin apenas tener conocimientos de utilización del mismo.



- El análisis de las gráficas y diagramas obtenidos, demuestra claramente que la zona más crítica de la banda transportadora es la existente en los tramos cercanos al tambor de cola, siendo la peor la correspondiente al lado tenso de la cinta.

Teniendo en cuenta los comentarios anteriores, se puede confirmar que es perfectamente viable el análisis de la banda transportadora mediante modelos de elementos finitos. En la actualidad la gran mayoría de diseños ingenieriles son estudiados mediante ordenadores antes de proceder a su fabricación. Gracias a los programas informáticos se logra conseguir una mayor rentabilidad temporal y económica en la producción de nuevos modelos, consiguiendo que estos sean más fiables y seguros.

Definitivamente se puede afirmar que se han alcanzado los objetivos establecidos al principio del proyecto, constatando que mediante las herramientas y programas escogidos para su realización se ha obtenido un resultado satisfactorio.

# CAPITULO 9

## TRABAJOS FUTUROS

### 9.1. TRABAJOS FUTUROS

Teniendo en cuenta los procesos de cálculo, diseño, obtención y estudio de resultados que se han expuesto en el presente documento, se podrán abordar otros proyectos futuros orientados al estudio de las bandas transportadoras, alguno de los cuales se comentan a continuación:

- Ampliación de la cantidad de materiales elásticos utilizados en ANSYS para el diseño y caracterización de la banda transportadora, de manera que también sea un valor parametrizado que calcule el software de diseño de la banda.
- Optimización del modelo de elementos finitos utilizando un mallado más fino en todos los elementos. En este caso será necesario disponer de equipos informáticos más potentes que reduzcan el tiempo de simulación.

- Realización del estudio de elementos finitos del sistema transportador completo, es decir, considerando los rodillos superiores, los inferiores, el tambor de accionamiento, el de cola, los posibles tambores desviadores, etc.
- Introducción del software en una página web dedicada al estudio y cálculo de bandas transportadoras, así como en webs de empresas relacionadas con el tema.

# **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Tutorial ANSYS castellano, Dres. Juan Jose del Coz Diaz/D. Fco Jose Surez Domínguez. E.T.S. Ingenieros Industriales-GIJON
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisisdeelementosfinitos> (Noviembre 2010)
- [3] [http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_los\\_elementos\\_finitos](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos) (Noviembre 2010)
- [4] <http://prof.usb.ve/ecasanov/> (Septiembre 2010)
- [5] <http://descom.jmc.utfsm.cl/sgeywitz/procesos/CINTAS.htm>. (Septiembre 2010)
- [6] <http://www.mjv.es>. (Septiembre 2010)
- [7] Manual de fabricación de bandas y rodillos transportadores- Pirelly, Willian- Editorial Mac Graw Hill- Impreso en Madrid (España) 1992
- [8] [http://es.wikipedia.org/wiki/Peso\\_espec%C3%ADfico](http://es.wikipedia.org/wiki/Peso_espec%C3%ADfico) (Diciembre 2010).
- [9] [http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/ingenieria-de-transportes/prob\\_3\\_1.pdf](http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/ingenieria-de-transportes/prob_3_1.pdf)
- [10] Catálogo 699 Bett Conveyor Idlers, Inc.
- [11] Belt Conveyor CEMA Handbook, 2ª Edición
- [12] Catálogo Belt Conveyor, Roulunds
- [13] [www.kauman.com/es/products/infot\\_carcasa\\_es.asp](http://www.kauman.com/es/products/infot_carcasa_es.asp) (Septiembre 2010)
- [14] [www.kauman.com/es/products/bt\\_datostecnicos\\_es.asp](http://www.kauman.com/es/products/bt_datostecnicos_es.asp) (Septiembre 2010)
- [15] [http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/ingenieria-de-transportes/material-de-clase-1/bandas\\_transportadoras.pdf](http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/ingenieria-de-transportes/material-de-clase-1/bandas_transportadoras.pdf) (Noviembre 2010)
- [16] <http://www.slideshare.net/sandrap0/visual-basic> (Noviembre 2010)
- [17] <http://es.wikipedia.org/wiki/ANSYS> (Noviembre 2010)

- [18] [http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/reglas\\_mallado.htm](http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/reglas_mallado.htm) (Noviembre 2010).
- [19] [http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/examples/ansys55/html/elem\\_55/chapter4/ES4-181.htm](http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/examples/ansys55/html/elem_55/chapter4/ES4-181.htm) (Diciembre 2010)
- [20] [http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/examples/ansys55/html/elem\\_55/chapter4/ES4-163.htm](http://mechanika2.fs.cvut.cz/old/pme/examples/ansys55/html/elem_55/chapter4/ES4-163.htm) (Diciembre 2010)
- [21] [http://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n\\_de\\_Von\\_Mises](http://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n_de_Von_Mises) (Diciembre 2010)